



Bai, Xue

Test unterschiedlicher FE-Programme für die praktische Ausbildung

eingereicht als

Bachelorarbeit

An der

HOCHSCHULE MITTWEIDA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Maschinenbau

Mittweida, 2011

Erstprüfer : Prof. Frank Weidermann

Zweitprüfer : Dipl. -Ing. Andreas Wüstrich

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am :

Bibliographische Beschreibung

Bai, Xue:

Test unterschiedlicher FE-Programme für die praktische Ausbildung. 2011.-
Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Maschinenbau,
Bachelorarbeit, 2011

Referat:

Ziel der Bachelorarbeit ist den Test unterschiedlicher FE-Programme für die praktische Ausbildung. Hierfür wird FEM durch einige Beispiele mit Analyse der verschiedenen Arten. Mit Hilfe ANSYS Workbench bringt die Simulation schnelle und gut Ergebnisse, sollten einige Rahmenbedingungen erfüllt sein. FEM ist eine gute Ingenieurausbildung der Anwender zu nennen.

Inhalt

Inhalt	II
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabelleverzeichnis.....	V
Formelverzeichnis	VI
1. Grundlage der FEM	1
1.1 Grundidee der FEM	1
2. Workbench	2
2.1 Allgemeine Informationen zu ANSYS Workbench	2
2.1.1 DesignModeler.....	2
2.1.2 Simulation	3
2.2 Ablaufschema der FEM-Berechnung	3
3. Statisch-Mechanische Analyse	5
3.1 Beispiel von Welle.....	5
3.1.1 Aufgabenstellung	5
3.1.2 Berechnung der Welle mit ANSYS Workbench	5
4. Dynamik.....	13
4.1 Modalanalyse	13
4.2 Beispiel der Welle.....	14
4.2.1 Aufgabestellung der Welle	14
4.2.2 Berechnung der Welle mit ANSYS Workbench	14
5. Topologie-Optimierung	20
5.1 Vorteile:	20
5.2 Beispiele zur Topologie-Optimierung	20
5.2.1 Berechnung zur Maschinen.....	21
6. Temperaturfelder.....	25
6.1 Analogie der Gleichungen	25
6.2 Wärmeübertragungen.....	26
6.3 Arten der Wärmeübertragung	26
6.3.1 Wärmeleitung.....	26
6.3.1.1 Fouriersches Gesetz	27
6.3.1.2 Beispiele-Fußbodenheizung.....	28
6.3.1.2.1 Analyse mit ANSYS Workbench	29
6.3.2 Konvektion.....	33
6.3.2.1 Berechnung bei Konvektion	34
6.3.3 Wärmestrahlung.....	34
6.3.3.1 Berechnung der Wärmestrahlung	35
6.3.3.2 Beispiele zu Wärmestrahlung	37
6.3.3.2.1 Analysen die Wärmeübertragung mit der Strahlung	37
6.3.3.2.2 Berechnung mit ANSYS Workbench	38
7. Literaturverzeichnis	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2. 1: Datenübergabe	3
Abbildung 3. 1: Welle.....	5
Abbildung 3. 2: Struktur von ANSYS Workbench	6
Abbildung 3. 3: Material von Welle	6
Abbildung 3. 4: Lokale Koordinatensystem von Welle.....	7
Abbildung 3. 5: Elementgröße der Welle	8
Abbildung 3. 6: Netz der Welle	8
Abbildung 3. 7: Statisch- mechanische Analyse.....	9
Abbildung 3. 8: Gravitationsbeschleunigung der Welle.....	9
Abbildung 3. 9: Verschiebung der Welle	10
Abbildung 3. 10: Gesamtverformung der Welle.....	11
Abbildung 3. 11: Vergleichsspannung der Welle	12
Abbildung 4. 1: Welle in Solidworks	15
Abbildung 4. 2: Materialeigenschaften der Welle	15
Abbildung 4. 3: Zuordnung der Material der Welle	16
Abbildung 4. 4: Vernetzung der Welle	16
Abbildung 4. 5: Verfeinerung der Fläche	17
Abbildung 4. 6: Randbedingung der Welle.....	17
Abbildung 4. 7: Analyseeinstellung der Welle	18
Abbildung 4. 8: Behehle für Welle	18
Abbildung 4. 9: Verformung der Welle	19
Abbildung 5. 1: Maschinen in SolidWorks.....	21
Abbildung 5. 2: Struktur der Topologieoptimierung	22
Abbildung 5. 3: Zuordnung des Materials der Maschinen	22
Abbildung 5. 4: Vernetzung der Maschinen	23
Abbildung 5. 5: Definieren der Randbedingung.....	23
Abbildung 5. 6: Lösung der Maschinen.....	24
Abbildung 5. 7: Ergebnis der Maschinen	24
Abbildung 6. 1: Schema der Wärmeübertragung	26
Abbildung 6. 2: Diagramm der Wärmeleitung [18].....	27
Abbildung 6. 3: Fußbodenheizung.....	29
Abbildung 6. 4: Zuordnung der Material der Fußbodenheizung	30
Abbildung 6. 5: Kontakte zwischen beiden Körper.....	31
Abbildung 6. 6: Vernetzng der Fußbodenheizung.....	31
Abbildung 6. 7: Thermische Randbedingungen	32
Abbildung 6. 8: Analyseeinstellung der Fußbodenheizung	32
Abbildung 6. 9: Ergebnis der Fußbodenheizung	33

Abbildung 6. 10: Aufbau der Wärmestrahlung.....	37
Abbildung 6. 11: Importieren der Geometrie	38
Abbildung 6. 12: Vernetzung der Geometrie.....	38
Abbildung 6. 13: Hinzufügen der Komponenten.....	39
Abbildung 6. 14: Definieren der Temperatur	39
Abbildung 6. 15: Befehle der Randbedingungen.....	40
Abbildung 6. 16: Temperatur der inneren Zylinder.....	41
Abbildung 6. 17: Temperatur der äußeren Zylinder	41
Abbildung 6. 18: Temperatur zwischen beider Zylindern.....	42
Abbildung 6. 19: Befehl der Lösung.....	43
Abbildung 6. 20: Einfließende Wärme	43
Abbildung 6. 21: Abfließende Wärme	44

Tabelleverzeichnis

Tabelle 6. 1: Wärmeübertragungseigenschaften einiger Stoffe [21]	28
Tabelle 6. 2: Werkstoffdaten der Fußbodenheizung.....	29
Tabelle 6. 3: Kontakttypen [22]	30
Tabelle 6. 4: Strahlungsaustauschkoeffizienten [28]	36

Formelverzeichnis

Formel 3. 1: Allgemeine Spannung	11
Formel 3. 2: Hauptspannung.....	11
Formel 3. 3: Spannung in Ebene.....	12
Formel 4. 1: ungedämpfte Eigenfrequenz.....	13
Formel 4. 2: gedämpfte Eigenfrequenz.....	14
Formel 6. 1: Fouriersches Gesetz.....	27
Formel 6. 3: Wärmestrom bei Konvektion	34
Formel 6. 4: Wärmestromdicht	34
Formel 6. 5: Wärmestrom bei Wärmestrahlung [26]	35
Formel 6. 6: Emissionsgrad [26].....	35
Formel 6. 7: spezifische Ausstrahlung [26]	35
Formel 6. 8: Netto-Wärmestrom von 1 zu 2	35
Formel 6. 9: Strahlungsaustauschkoeffizient C_{12}	36
Formel 6. 10: Wärmestrom des Strahlungsaustausch	36

1. Grundlage der FEM

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Sie ist ein weit verbreitetes modernes Berechnungsverfahren im Ingenieurwesen und ist das Standardwerkzeug bei der Festkörpersimulation. Das Verfahren liefert eine Näherungsfunktion an die exakte Lösung der Differentialgleichung, deren Genauigkeit durch die Erhöhung der Freiheitsgrade und damit des Rechenaufwandes verbessert werden kann. [1]

1.1 Grundidee der FEM

Die Grundidee ist daher, diese komplexe Geometrie in einzelne Teilbereiche (die sog. Elemente) zu zerlegen. Jeder Teilbereich ist einfach beschreibbar. Die Einzellösungen der einzelnen Bereiche (Elemente) werden aufsummiert, um die Lösung für das Gesamtsystem zu erhalten. Nachdem die Anzahl der Teillösungen endlich ist, leitet sich aus dieser Grundidee der Name Finite-Elemente-Methode ab. Die Verbindung der einzelnen Elemente besteht an den sogenannten Knoten, d.h. Punkten an den Ecken, manchmal auch auf den Verbindungslinien dazwischen. [2]

2. Workbench

ANSYS ist eine Finite-Elemente-Software. Das Programm ANSYS dient zur Lösung von linearen und nichtlinearen Problemen aus der Strukturmechanik, Fluidmechanik, Akustik, Thermodynamik, Piezoelektrizität, Elektromagnetismus sowie von kombinierten Aufgabenstellungen (Multiphysik). Es besitzt eine Vielzahl von Elementtypen für 1-, 2-, und 3- dimensionale Aufgaben. [3]

Das Produkt ANSYS liegt momentan in zwei unterschiedlichen Versionen vor. Hierbei gibt es die klassische Version („ANSYS Classic“) und eine Version mit weitgehend graphischer Bedienerführung („ANSYS Workbench“). [3]

ANSYS Workbench soll dem Benutzer die Eingabe von Berechnungsproblemen vereinfachen. Neben einer modernen GUI verfügt ANSYS Workbench über verbessert Algorithmen zur Kontaktfindung, Vernetzung zu diversen CAD-Systemen. Allerdings enthält ANSYS Workbench noch nicht den vollen Funktionsumfang von ANSYS Classic. Mittels Befehlen in APDL können Funktionen aus ANSYS Classic auch im Workbench verwendet werden. [3]

2.1 Allgemeine Informationen zu ANSYS Workbench

Workbench ist ein Programm, welches aus verschiedenen Modulen besteht, die in einem Projekt zusammengefasst werden. Dies wird direkt beim Starten deutlich, hier werden direkt alle installierten Module angezeigt. [4]

Datenstruktur: Diese Module spiegeln sich ebenfalls in der Datenbasis eines jeden Projektes wieder. Hier wird die Datenstruktur beispielhaft für die im Workshop verwendeten Module „DesignModeler“ und „Simulation“ vorgestellt. [4]

- Name .wbdb, enthält die übergreifenden Daten
- Name .dsdb, enthält die FE-Daten aus dem Modul „Simulation“
- Name .agdb, enthält die Geometriedaten aus den „DesignModeler“

2.1.1 DesignModeler

Der DesignModeler ist das Geometrie- Modul von Workbench. Hier können neue Geometrie neu erstellt und bearbeitet werden. Vorrangig ist der DesignModeler jedoch dafür ausgelegt verschiedene Dateiformate aus Zeichenprogrammen importieren zu können und diese so für die FEM-Analyse zugänglich zu machen. [4]

Der DesignModeler arbeitet im Wesentlichen in zwei unterschiedlichen Modi:

Skizzier-Modus: Im Skizzier-Modus wird i.d.R. zuerst eine Skizze von Teilen des Modells erstellt. Hierbei spielen die genauen Abmessungen vorerst keine Rolle. Diese werden in einem weiteren Schritt angebracht. Die Vermassung ist „abhängig“, d.h. wird bei vollständiger Vermassung eine Länge o.ä. geändert, ändern sich alle verbundenen Maße mit. Die Darstellung der Vermassung ändert sich, je nachdem ob sie unvollständig, vollständig oder überdefiniert ist. [4]

Modellier-Modus: Im Modellier-Modus werden dann durch „Operationen“ aus den skizzierten Teile, d.h. Flächen oder Volumen. Hierzu stehen verschiedene Operationen zur Verfügung. Die Eingabe wird hier i.d.R. mit Erstellen abgeschlossen. [4]

2.1.2 Simulation

Im Modul Simulation werden die Geometriedaten aus dem Modul DesignModeler weiter verwendet. Hier werden die Randbedingungen aufgebracht und Vernetzt. Die vorbereiteten Daten werden dann an den Solver ANSYS Classic übergeben. Dort erfolgt dann das Lösen. Das Postprocessing erfolgt dann wieder im Modul Simulation. Die Datenübergabe erfolgt voll automatisch. Schematisch ist dies in Abbildung 2.1 gezeigt. Dadurch, dass ANSYS Classic als Solver verwendet wird, ist das Einbinden von APDL-Kommandos an verschiedenen Stellen möglich. Auch lässt sich eine Eingabedatei für ANSYS Classic des gesamten FEM-Modells erzeugen, die dann eingelesen werden kann. [4]

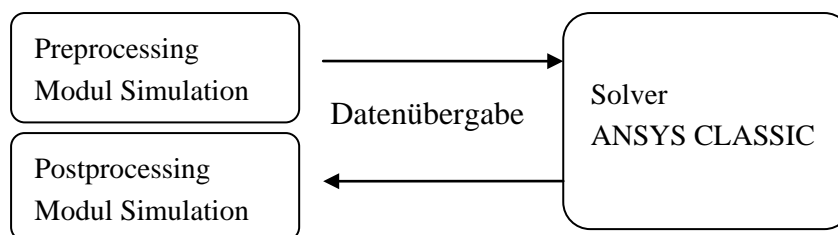


Abbildung 2. 1: Datenübergabe

2.2 Ablaufschema der FEM-Berechnung

Wir ergeben sich folgendes Ablaufschema einer typischen FEM Berechnung: [4]

- I. Preprocessing (Vorlauf)
 - a) Erzeugen der Knotengeometrie der Konstruktion
 - b) Festlegen des Finiten-Element-Typs
 - c) Vernetzen (Beschreiben der Konstruktion durch eine Summe von Finiten Elementen)

- II. Solver (Aufbau und lösen des FE-Systems)
 - a) Aussagen über die verwendeten Werkstoffe
 - b) Anwenden der Elementsteifigkeitsbeziehung der Elemente (Vorgeben der Verknüpfungsbedingungen)
 - c) Zusammenbau zum Gesamtsystem für das komplette Modell
 - d) Definition der Randbedingungen und Belastungen
 - e) Lösen des Gleichungssystems
 - f) Berechnen der unbekannten Knotenverschiebungen
- III. Postprocessing (Nachlauf)
 - a) Nachlaufrechnung (z.B. Rückrechnung der Spannungen in jedem einzelnen Element)
 - b) Bilden der Durchschnittswerte und graphische Darstellung
 - c) Ergebnisbewertung und-auswertung

3. Statisch-Mechanische Analyse

Die Statisch-Strukturmechanische Analysen ermitteln die Verformung, Spannungen und Dehnungen in Bauteilen in Abhängigkeit von äußeren, ruhenden Lasten ohne dynamische oder dämpfende Effekte. Optional liefert die Betriebsfestigkeitsanalyse die Lebensdauer eines Designs unter dynamischen Lasten. Unter Berücksichtigung von geometrischen Nichtlinearitäten können mit statisch- mechanischen Analysen auch nichtlineare Beulberechnungen durchgeführt werden. [6]

3.1 Beispiel von Welle

3.1.1 Aufgabenstellung

Materialeigenschaften: Stahl

Elastizitätsmodul: $E=210000 \text{ N/mm}^2$

Dicht: $\rho = 78500 \text{ kg/mm}^3$

Poissonzahl: $\nu=0,3$

Gravitationsbeschleunigung: $g_y=9810 \text{ mm/s}^2$

Winkel des Loslagers: $W=45^\circ$

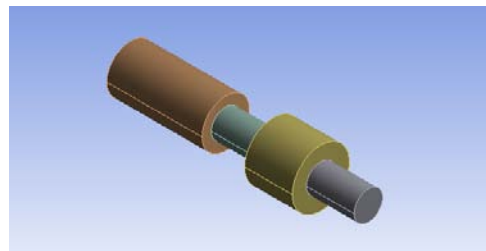


Abbildung 3. 1: Welle

3.1.2 Berechnung der Welle mit ANSYS Workbench

Zuerst zeichnet man die 3D Geometrie wie die Abbildung 3.1. Man kann mit SolidWorks die Welle zeichnen und mit .IGS-Datei speichern, oder mit Workbench im Fenster von der Geometrie skizzieren und modellieren. Man hat die Materialeigenschaften definiert und die Geometrie importiert, danach kann man in Abbildung 3.2 das Modell doppelte klicken.

In ANSYS Workbench werden unter Model alle Definitionen zusammengefasst, die zwischen Geometrieerzeugung und Definition des Lastfalls liegen. Dazu gehören die Definition von physikalischen Eigenschaften für die Geometrie (Material, Zusatzmassen), Hilfsgeometrie für Randbedingungen und Auswertung sowie für Vernetzung, Koordinatensysteme, Kontakte, die Vernetzungssteuerung und die Lösungskombination zur Überlagerung mehrerer Lastfälle. [7]

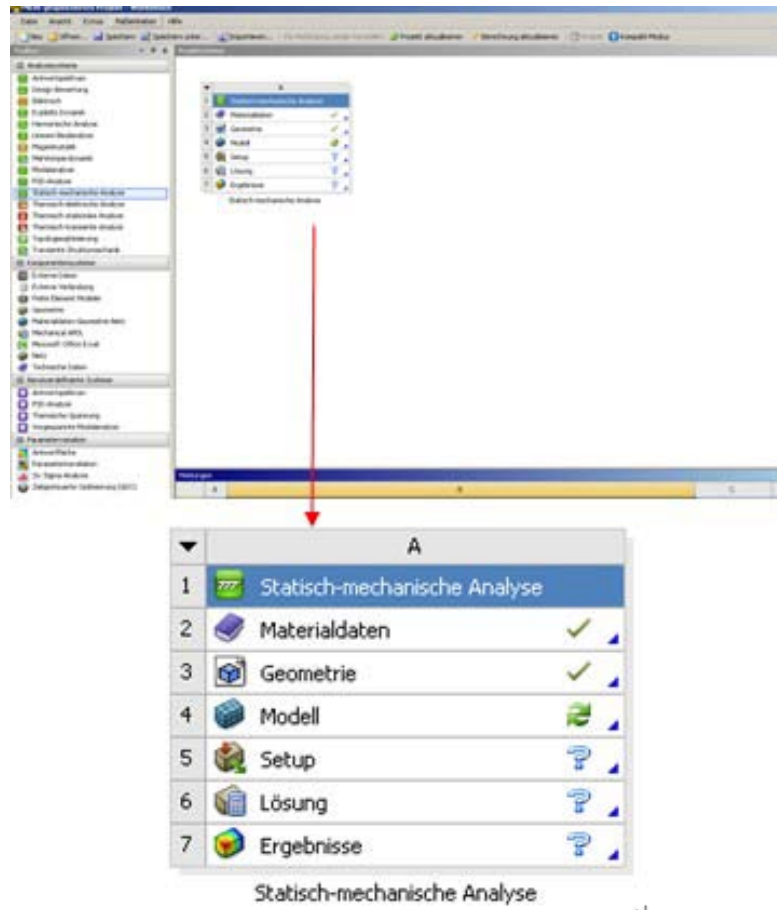


Abbildung 3. 2: Struktur von ANSYS Workbench

Unter Geometrie werden alle eingelesenen Teile mit ihren Eigenschaften wie Material, Masse, Status, Sichtbarkeit, Farbe etc. aufgelistet. Jedes Teil kann über das Detailfenster unterdrückt oder ausgeblendet werden, andere Materialeigenschaften erhalten, transparent dargestellt werden etc. Für die Materialzuordnung stehen diejenigen Materialien zur Verfügung, die unter den technischen Daten definiert oder importiert werden. [8] Man kann das Material jedes Teiles verfügen und wähle den Baustahl aus.(siehe Abbildung 3.3)

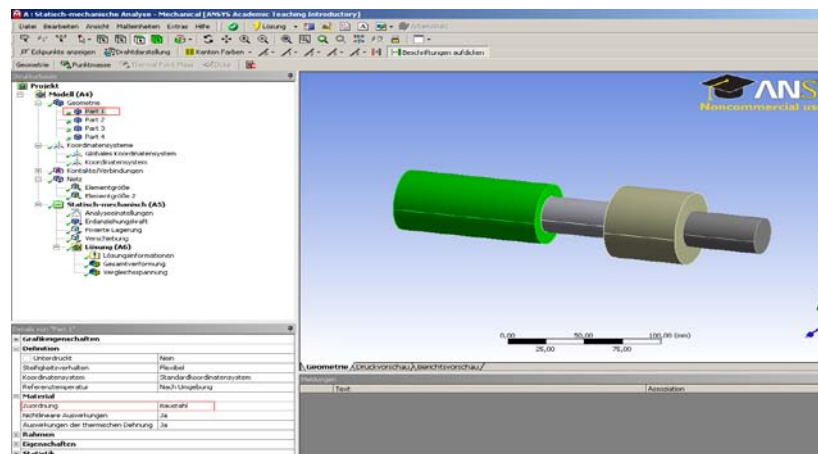


Abbildung 3. 3: Material von Welle

Die lokalen Koordinatensysteme können dazu verwendet werden, bezogen auf gewisse Richtungen, Lasten zu definieren oder Ergebnisse auszuwerten.

Es können mit der rechten Maustaste mit Einfügen weitere Koordinatensysteme erzeugt werden. Dazu am besten zuerst eine Geometrie selektieren, nach folgender Logik wird dann der Ursprung definiert:

- Punkt-Ursprung am Punkt
- Linie-Ursprung in der Mitte
- Kreislinie und Bogen-Ursprung im Zentrum
- Ebene Fläche-Ursprung in der Ebene, im Flächenschwerpunkt
- Zylinderfläche-Ursprung in der Rotationsachse, axial in der Mitte

Koordinatensysteme können auch verändert werden, indem sie verschoben oder gedreht werden. Dazu stehen bei selektiertem Koordinatensystem folgende Funktionen zur Verfügung (3 x verschieben, 3 x Drehen, 3 x Achsrichtung wechseln):



Es gibt zwei Arten von Koordinatensystemen: kartesische und zylindrische. Bei zylindrischen Koordinatensystemen stehen die Komponenten x, y, z für radial, tangential, axial. [8]

In Abbildung 3.4 wird die lokale Koordinatensystem hinzugefügt, damit eine Seite der Welle mit dem Winkel 45Grad in z-Richtung zu drehen.

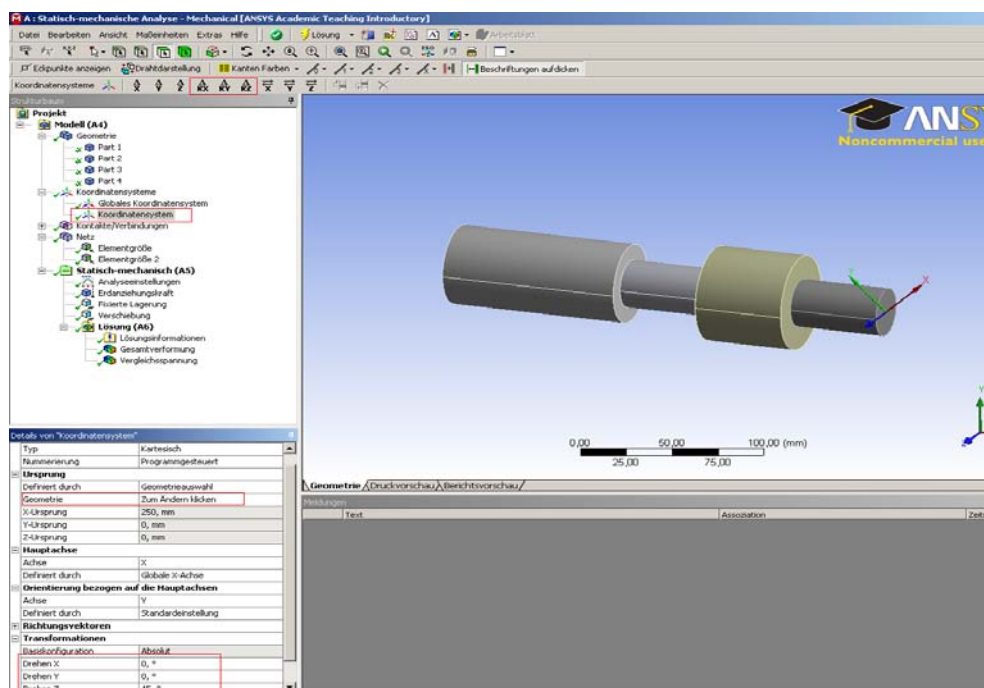


Abbildung 3. 4: Lokale Koordinatensystem von Welle

Die Vernetzung ist das Zerlegen der Geometrie in einfach beschreibbare Teilgebiete, die Elemente. Die einzelnen Elemente sind an den Eckknoten und soweit vorhanden an den Mittelknoten miteinander verbunden. [9]

Für jedes Bauteil kann durch die Funktion Elementgröße eine Elementgröße in mm definiert werden. Ebenso können an bestimmten Geometrien innerhalb eines Volumens oder einer Fläche lokale Netzverfeinerungen definiert werden (siehe Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6). [9]

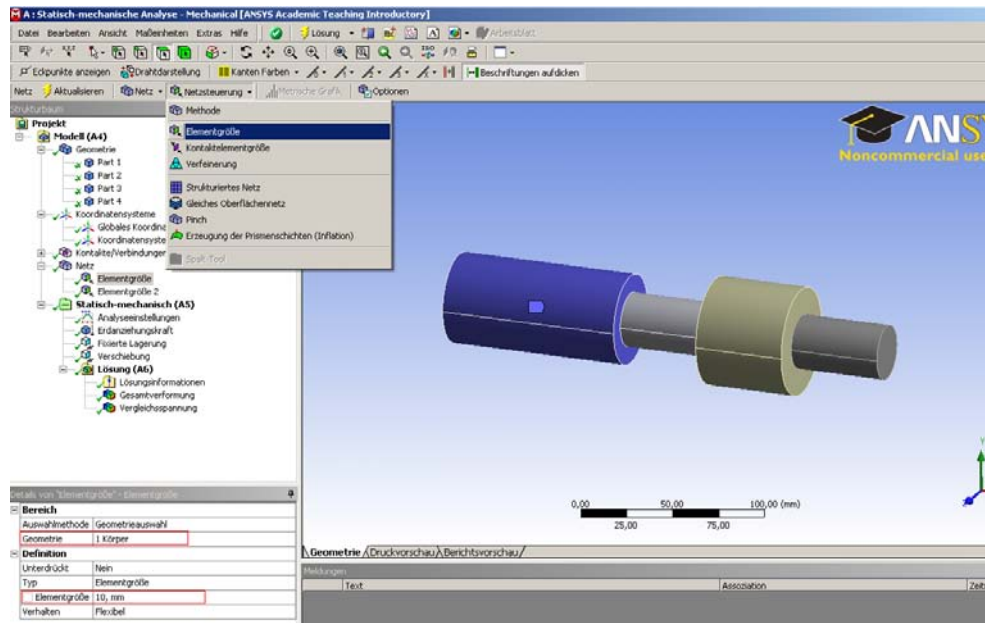


Abbildung 3. 5: Elementgröße der Welle

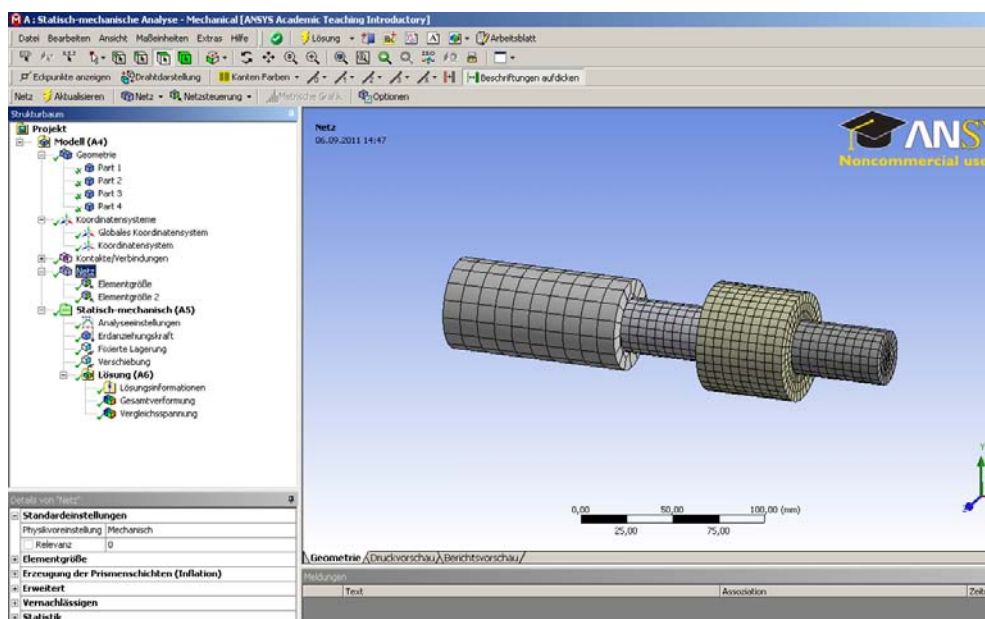


Abbildung 3. 6: Netz der Welle

Jede Randbedingung ist eine Vereinfachung für den „Rest der Welt“, der in der Berechnung durch die Randbedingung ersetzt ist. Durch diese Vereinfachung sind Ungenauigkeiten an der Randbedingung selbst eher die Regel als die Ausnahme. Daher sollte direkt an Randbedingungen nicht ausgewertet werden. Randbedingungen beziehen sich in der Regel auf die selektierte Geometrie (siehe Abbildung 3.7). [10]

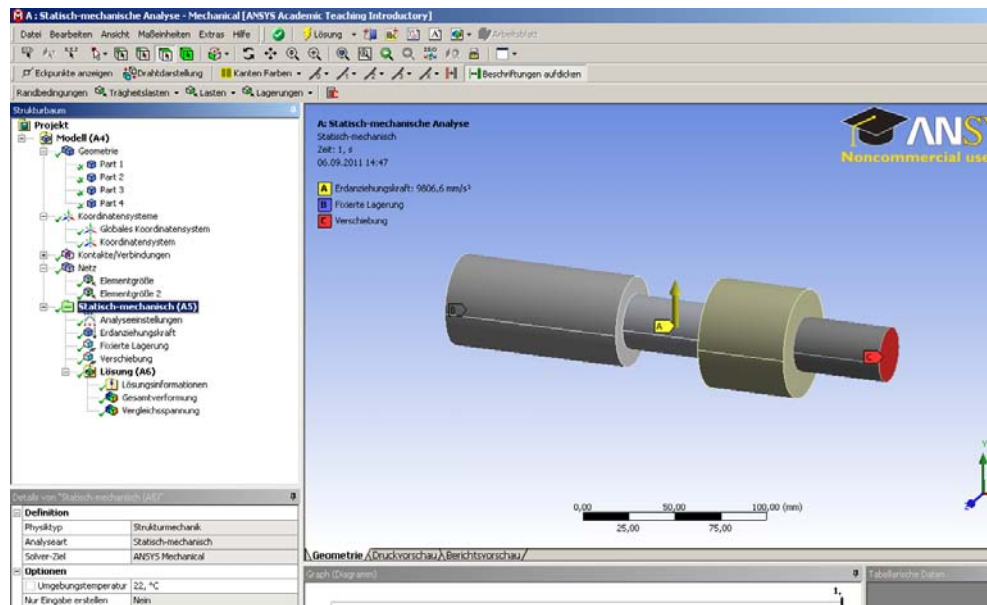


Abbildung 3. 7: Statisch- mechanische Analyse

Die Erdanziehungskraft bewirkt als Kraft eine Verformung in Richtung des Vektors. Die Kraftgröße ergibt sich aus der Masse der Bauteile. Die Verformung findet statt in Richtung der Definition dieser Randbedingung. [11] Klickt man die Statisch-mechanische-Analyse/Trägheitslasten/Erdanziehungskraft und wähle die positive y-Richtung aus. (siehe Abbildung 3.8)

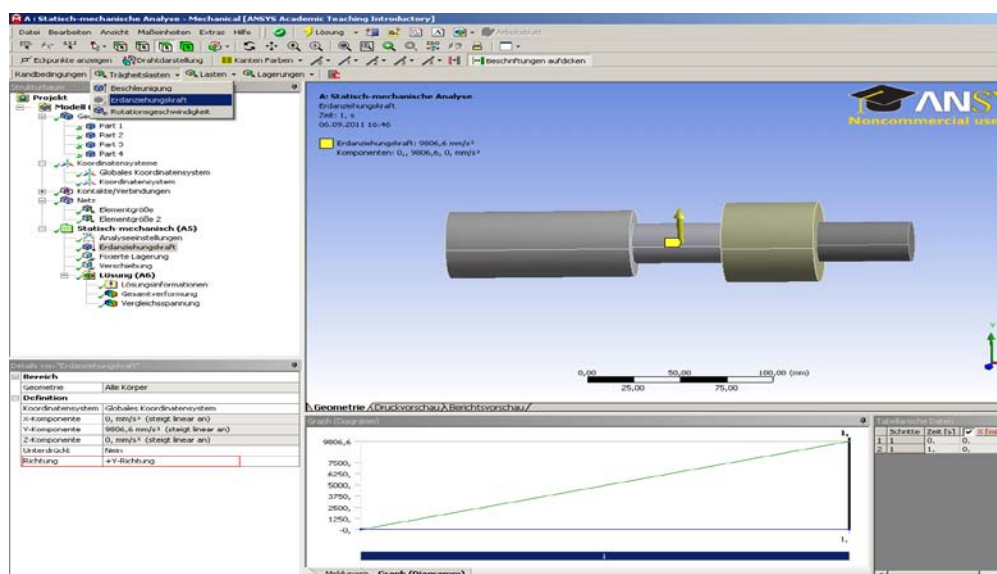


Abbildung 3. 8: Gravitationsbeschleunigung der Welle

Die Verschiebung kann an einer Fläche, Kante oder einem Punkt definiert werden. Wenn alle drei Verschiebungskomponenten festgehalten werden, ist das Bauteil über diese Fläche komplett eingespannt. Wird ein Verschiebungswert von 0 definiert, ist das Bauteil in dieser Richtung gelagert. Eine „Verschiebung“ von $x = \text{frei}$, $y = \text{frei}$, $z = 0$ heißt also, dass die betreffende Geometrie in z -Richtung gelagert, in x und y aber frei beweglich ist. (siehe Abbildung 3.9) [11]

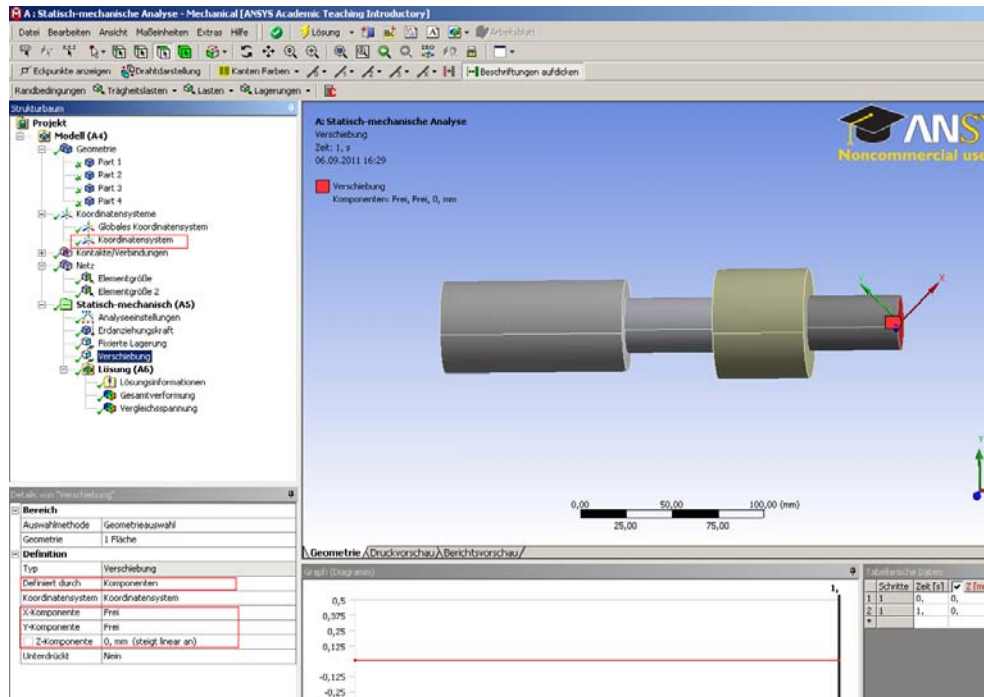


Abbildung 3. 9: Verschiebung der Welle

Die Verformung ist das wichtigste Hilfsmittel, um die Güte einer Berechnung zu überprüfen. Zur Kontrolle der Randbedingungen betrachtet man die Verformung. Die Skalierung kann vergrößert werden, sodass die Verformungstendenz besser sichtbar wird.[12] Es gibt verschiedene Verformung mit verschiedener farblich gekennzeichnetem Bereiche der numerischen Spanne. Von oben nach unten wird den Wert von größer bis kleine bezeichnet (siehe Abbildung 3.10).

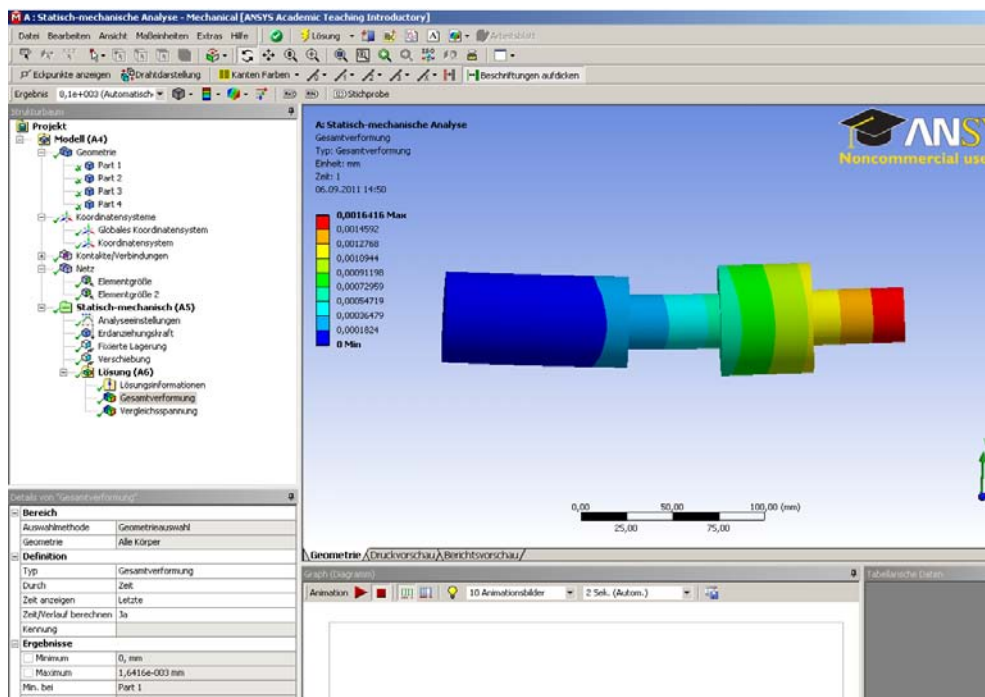


Abbildung 3. 10: Gesamtverformung der Welle

Die Vergleichsspannung bezeichnet eine fiktive einachsige Spannung, die dieselbe Materialbeanspruchung darstellt wie ein realer, mehrachsiger Spannungszustand. Damit kann der wirkliche dreidimensionale Belastungszustand im Bauteil, bestehend aus Normal-Spannungen und Schub-Spannungen in alle drei Raumrichtungen. [13]

Beschreibung im allgemeinen Spannungszustand:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

Formel 3. 1: Allgemeine Spannung

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: die Normalspannung

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$: die Schubspannung

Beschreibung im Hauptspannungszustand:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2]}$$

Formel 3. 2: Hauptspannung

σ_I, σ_{II} und σ_{III} sind die Hauptspannungen.

Beschreibung im ebenen Spannungszustand:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

Formel 3. 3: Spannung in Ebene

Man kann in Abbildung 3.11 die Vergleichsspannung in jedem Bereich der Welle ablesen, und wo tragen die größere Spannung oder kleinere Spannung. Von oben nach unter der Farbbände zeigt den Wert der Vergleichsspannung immer kleiner.

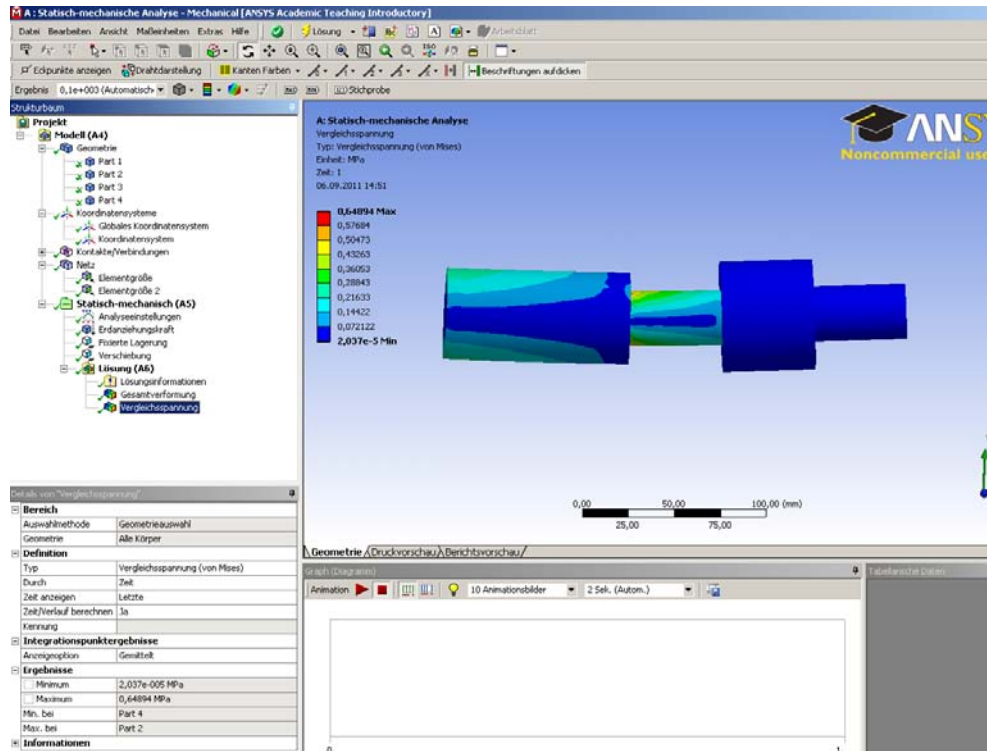


Abbildung 3. 11: Vergleichsspannung der Welle

4. Dynamik

Dynamische FEM-Analysen lassen sich grob in zwei Klassen einteilen:

Die lineare Dynamik erfasst das Schwingungsverhalten von Systemen im Frequenzbereich. Damit lassen sich per Modalanalyse die Eigenfrequenzen und zugehörigen Schwingungsformen (Eigenformen) ermitteln, in angeregten Schwingungen der Einfluss der Anregung und Dämpfung berücksichtigen und in weitergehenden Analysen zyklische Symmetrie, Rotordynamik, reibungsinduzierte Schwingungen, der Einfluss von internen oder externen Flüssigkeiten (Fluid-Struktur-Interaktion-FSI); Erdbeben und zeitliche Abläufe untersuchen. [14]

Die nichtlineare Dynamik basiert auf einer Lösung im Zeitbereich, d.h., der zeitliche Ablauf wird in kleinen Zeitschritten schrittweise aufgelöst. Es lassen sich alle Arten von Nichtlinearitäten berücksichtigen (Material, Kontakt, geometrische Nichtlinearität). [14]

4.1 Modalanalyse

Die Modalanalysen ermitteln die Eigenfrequenzen und die Schwingungsformen einer Struktur. Die Eigenfrequenzen werden als Vergleichswerte für mögliche Anregungen herangezogen (Resonanz), die Schwingungsformen zeigen Ansatzpunkte für mögliche Versteifungen zur Erhöhung der jeweiligen Frequenz. [6]

Für einfacher schwingende Systeme sind geschlossene Lösungen verfügbar, die auch in der Anwendung von FE-Systemen hilfreich sind, die grundlegenden Einflussgrößen zu beschreiben. So lassen sich an einem Einmassen-Schwinger die ungedämpften und gedämpften Eigen(kreis)frequenzen wie folgt bestimmen: [14]

$$\omega_u = \sqrt{k/m}$$

Formel 4. 1: ungedämpfte Eigenfrequenz

k: Steifigkeit

m: Masse

ω_u : Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems

$$\omega_d = \omega_u \sqrt{1 - D^2}$$

Formel 4. 2: gedämpfte Eigenfrequenz

ω_d : Eigenkreisfrequenz des dämpften Systems

D: Dämpfungsgrad

4.2 Beispiel der Welle

4.2.1 Aufgabestellung der Welle

Materialeigenschaften: Stahl

Elastizitätsmodul: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

Dicht: $\rho = 78500 \text{ kg/mm}^3$

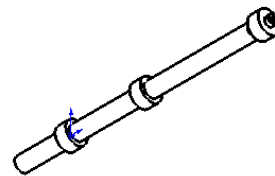
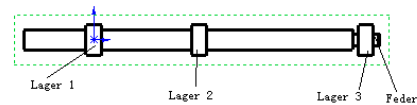
Poissonzahl: $\nu = 0,3$

Lagersteifigkeit 1: $100000000/6$

Lagersteifigkeit 2: $100000000/6$

Lagersteifigkeit 3: $890000/6$

Federsteifigkeit : $445000/6$



4.2.2 Berechnung der Welle mit ANSYS Workbench

Zeichnet man die 3D Geomtrie mit Solidworks und speichert mit .IGS-Datei wie Abbildung 4.1. Oder kann man mit ANSYS Workbench in Geometrie skizzieren und modellieren.

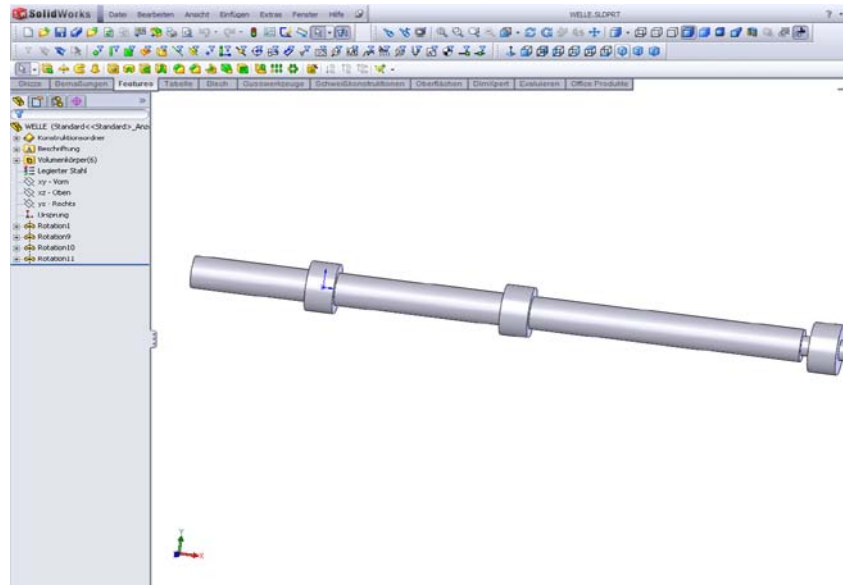


Abbildung 4. 1: Welle in Solidworks

Definiert man die Materialeigenschaften von Welle. Wenn die technische Daten nicht gilt, muss man die andere Materialeigenschaften hinzufügen. In Abbildung 4.2 wird die Materialeigenschaften der Lagern hinzugefügt und zurück zum Projekt. Danach wird die Geometrie importiert.

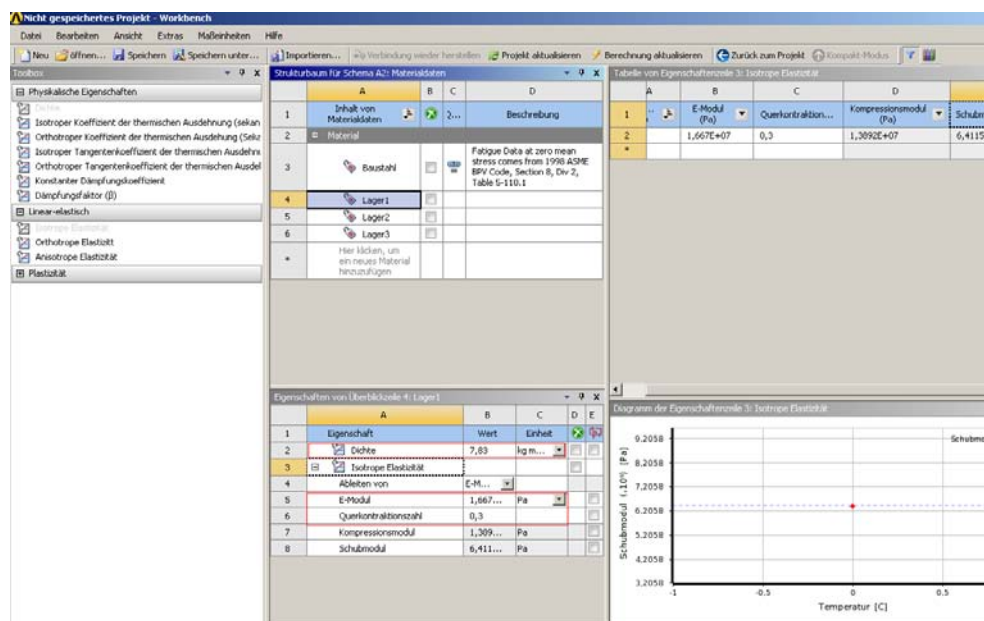


Abbildung 4. 2: Materialeigenschaften der Welle

Die Geometrie wird importiert und das Modell startet. In Abbildung 4.3 wird die jeder Part der Welle die Material zugeordnet.

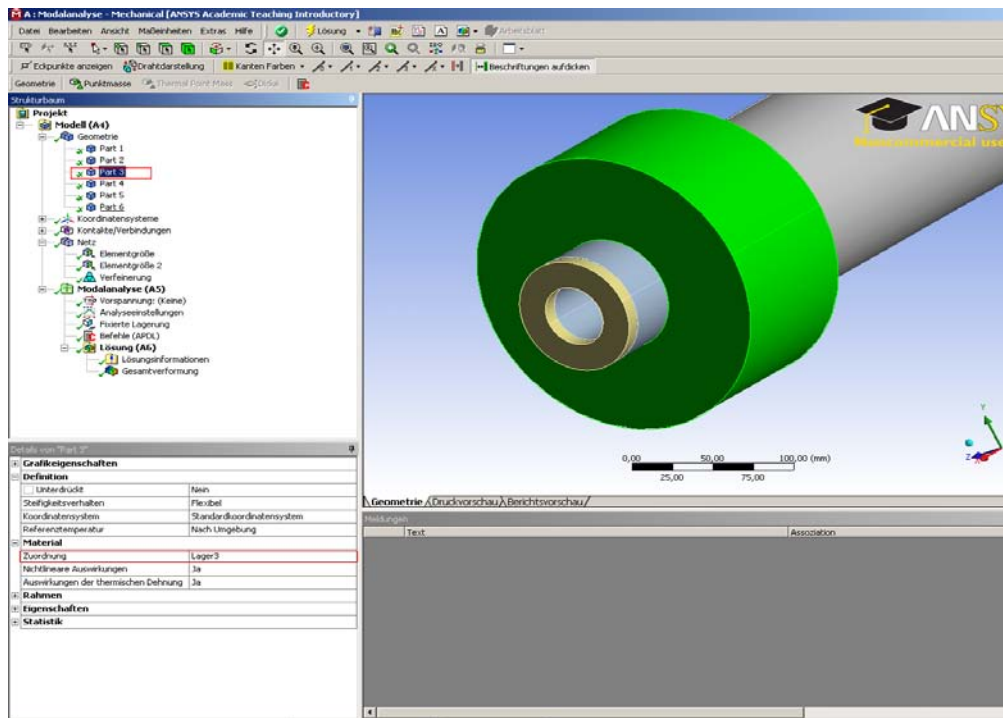


Abbildung 4. 3: Zuordnung der Material der Welle

Die Vernetzung hat verschiedene Art für verschiedene Status. In Abbildung 4.4 wird die Welle zwei verschiedene Methode vernetzt, damit Elementgröße und Verfeinerung. Die Welle und Lagern wird mit verschiedene Elementgröße vernetzt. Je kleiner die Elementgröße ist, umso höher ist die Genauigkeit des Ergebnisses.

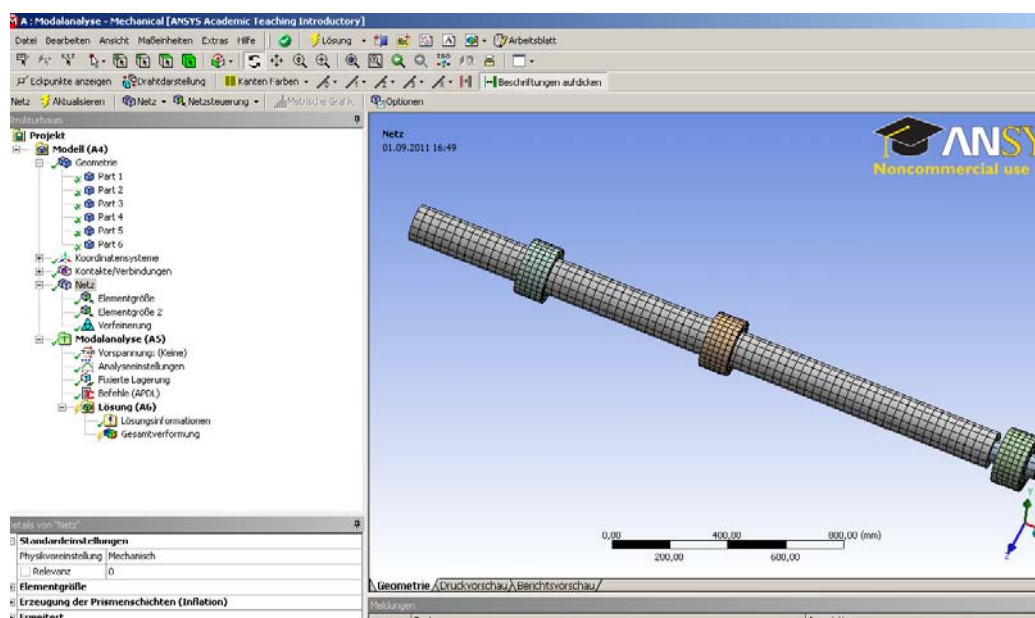


Abbildung 4. 4: Vernetzung der Welle

Die Namensgebung lässt viele Anwender die Funktion VERFEINERUNG anwählen. In Abbildung 4.5 wird ein bestehendes Netz an dieser Stelle, ausgehend von der groben Vernetzung, verfeinert. Damit können leider keine allzu großen

Verfeinerungsgrade erreicht werden, außerdem ist die lokale Elementqualität oft nicht ganz so gut. [9]

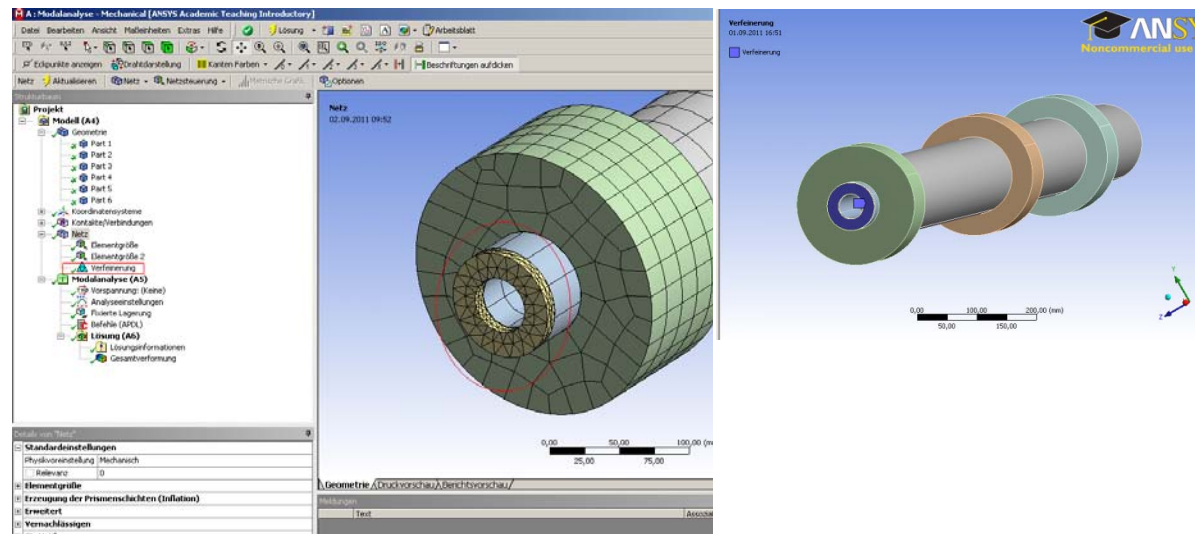


Abbildung 4. 5: Verfeinerung der Fläche

Definiert man die Randbedingungen der Welle, damit werden die drei Lagern und Feder festgelegt. Man selektiert die Lagern und Feder wie die Abbildung 4.6.

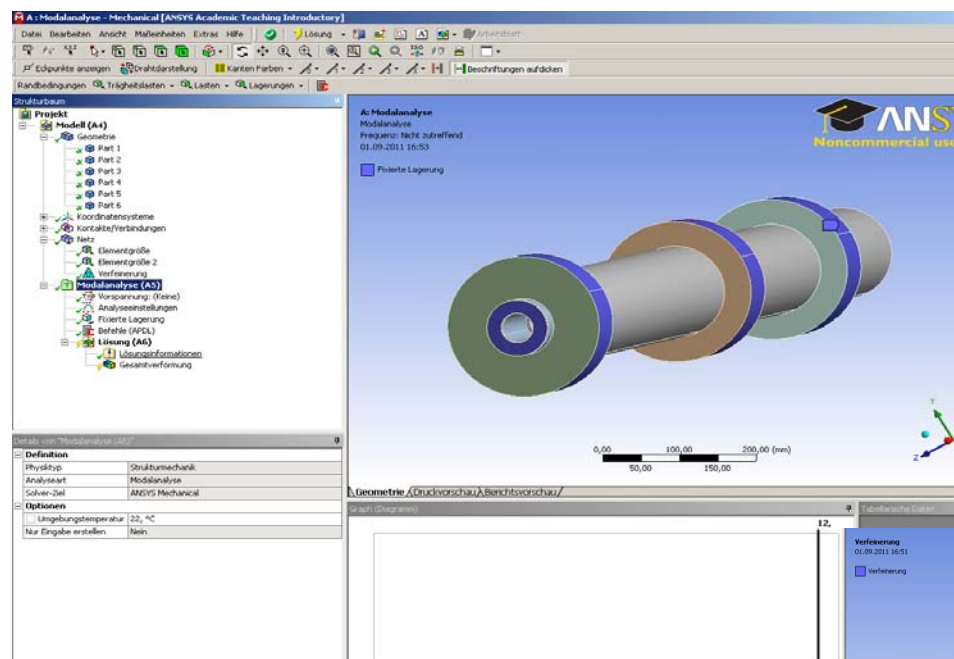


Abbildung 4. 6: Randbedingung der Welle

In Abbildung 4.7 kann man unter den Analyseeinstellungen der M Zahl der zu berechnenden Eigenfrequenzen 12 eintragen. Bevor gestartet wird, sollte man bedenken, das sowohl die Steifigkeit in der Analyse korrekt abgebildet ist. [15]

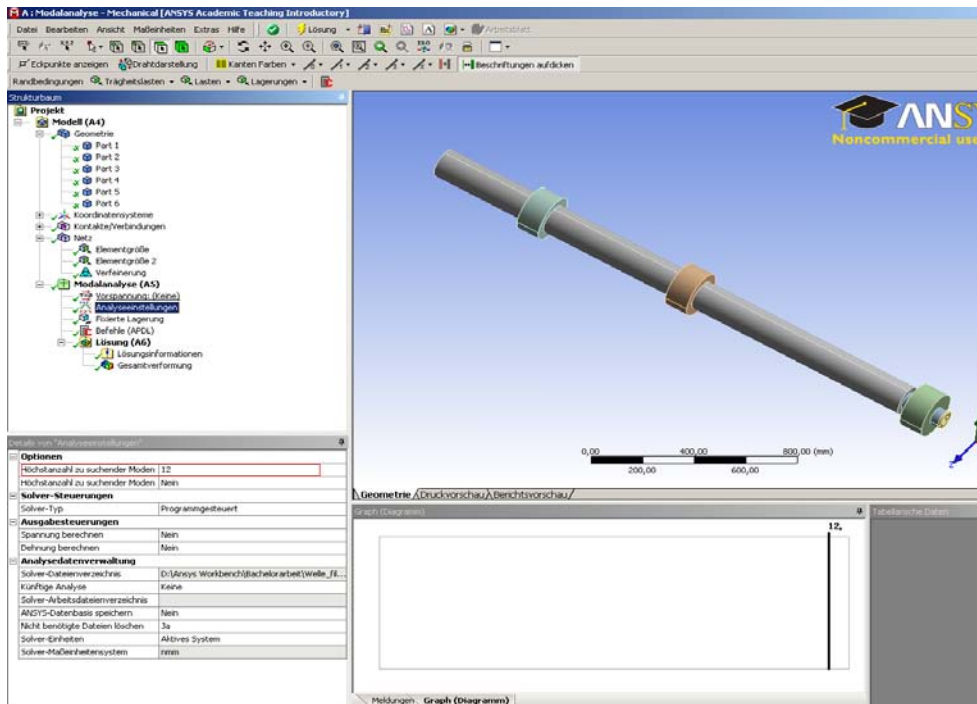


Abbildung 4. 7: Analyseeinstellung der Welle

Wenn die einige Randbedingungen nicht direkt eingegeben wird, kann man mit dem Befehle-Fenster die Bedingungen eingeben. In Abbilung 4.8 wird die Bedingung mit der Befehle der Modalanalyse gezeigt.

Gibt es die Optionen der Modalanalyse und die **Befehl**:

MODOPT, Method, NMODE, FREQB, FREQE, Cpxmod/PRMODE, Nrmkey, --, BlockSize

MODOPT Mode der Method: QRDAMP

QRDAMP: gedämpftes System mit QR-Algorithmus

NMODE: die Anzahl der Moden zu ertrahieren

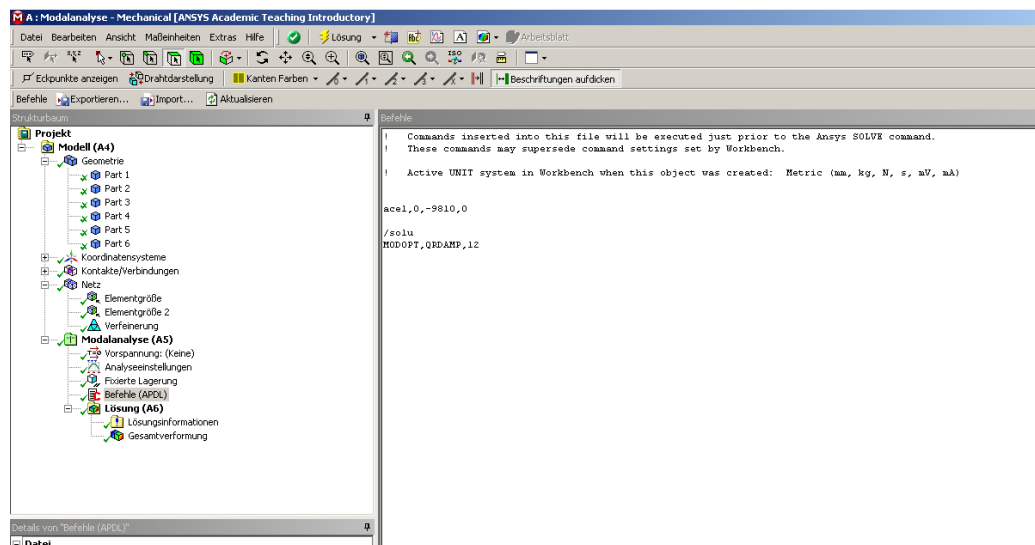


Abbildung 4. 8: Behehle für Welle

Nach der Berechnung erhält man mit einem Klick auf LÖSUNG die Liste der Eigenfrequenzen tabellarisch und als Graph angezeigt (siehe Abbildung 4.9). Um alle auftretenden Eigenschwingungsformen (Eigenformen) zu sehen, wählt man mit der rechten Maustaste eine Eigenfrequenz an.

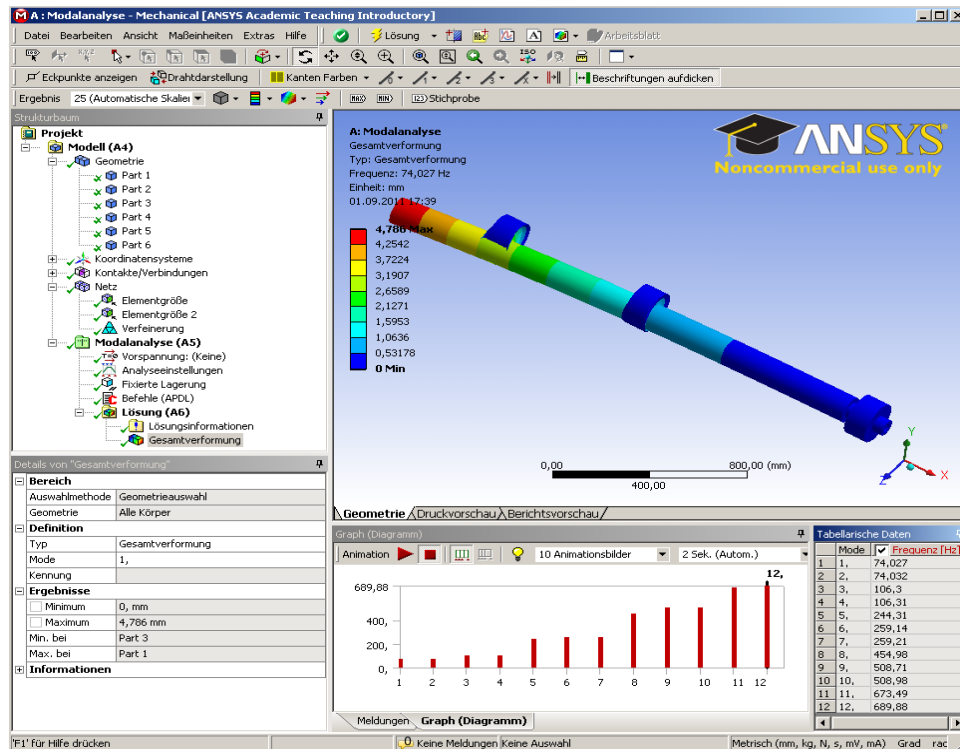


Abbildung 4. 9: Verformung der Welle

5. Topologie-Optimierung

Die Topologie-Optimierung ist ein Verfahren, um ohne parametrische Geometrie für Bauteile eine belastungsgerechte Form zu ermitteln. Der Anwender definiert den zur Verfügung stehenden Bauraum und den Grad des Materials, den er einsparen möchte. In einem iterativen Verfahren wird das Material schrittweise an den Stellen entfernt, an denen es die Steifigkeit am wenigsten beeinflusst. Die Topologie-Optimierung kann so helfen, für komplexe Belastungen oder Bauräume eine belastungsgerechte Form zu finden. [16]

Die Topologie-Optimierung sieht die in ANSYS Workbench geladene Geometrie als Verfügungsmasse, um für einen definierten Lastfall die ideale Materialverteilung in diesem Raum zu ermitteln. D.h., es kann kein Material außen hinzugefügt, sondern lediglich in bestimmten Bereichen entfernt werden. Der Anwender definiert dabei den Grad an Material, den er entfernen möchte (5 bis 90%). Geringe Werte der Materialreduktion zeigen ihm die Stellen, wo in der bestehenden Konstruktion Material eingespart werden kann. Ein hoher Grad an Materialreduktion zeigt mit dem verbleibenden „Gerippe“, wo Versteifungsrippen in der bestehenden Konstruktion angebracht werden können.[16]

5.1 Vorteile:

- Neue Ideen für die Formfindung
- Schnelle Ergebnisse für einen zielgerichteten Konstruktionsprozess
- Einsparung von Konstruktions- und Berechnungsschleifen
- Innovative Bauteilkonstruktion
- Sicherung der Premium-Position im Konzern
- Wettbewerbsvorsprung

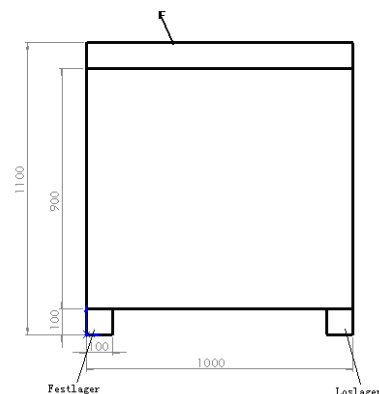
5.2 Beispiele zur Topologie-Optimierung

Materialdaten: Stahl

E-Modul: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

Querkontraktionszahl: $\nu = 0,3$

Randbedingungen: $F = 10 \text{ N}$



5.2.1 Berechnung zur Maschinen

Zuerst zeichnet man diese Maschine mit SolidWorks in xy-Ebene. Danach kann man mit .IGS speichern (Abbildung 5.1).

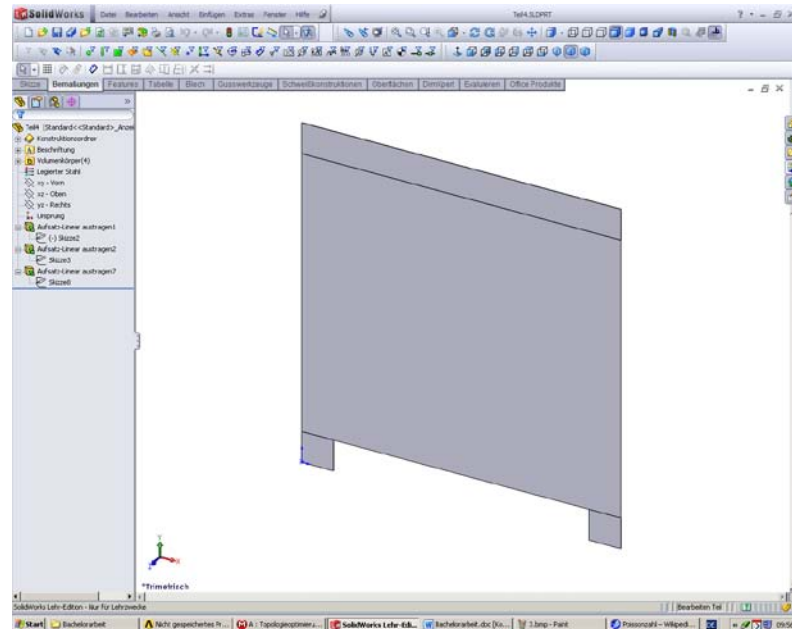


Abbildung 5. 1: Maschinen in SolidWorks

Man möchte diese Maschine optimieren mit ANSYS Workbench. Muss man die Materialeigenschaften von der Maschine definieren. Das Material wird standardmäßig als Stahl ausgewählt.

Mit der rechten Maustaste auf GEOMETRIE können Sie unter Geometrie Importieren/Durchsuchen die .IGS-Datei von dieser Maschinen auswählen. Und in Abbildung 5.2 wird das Fragezeichen hinter den Materialdaten und Geometrie das grüne Haken gewechselt. Danach wird Modell gestartet zu machen.

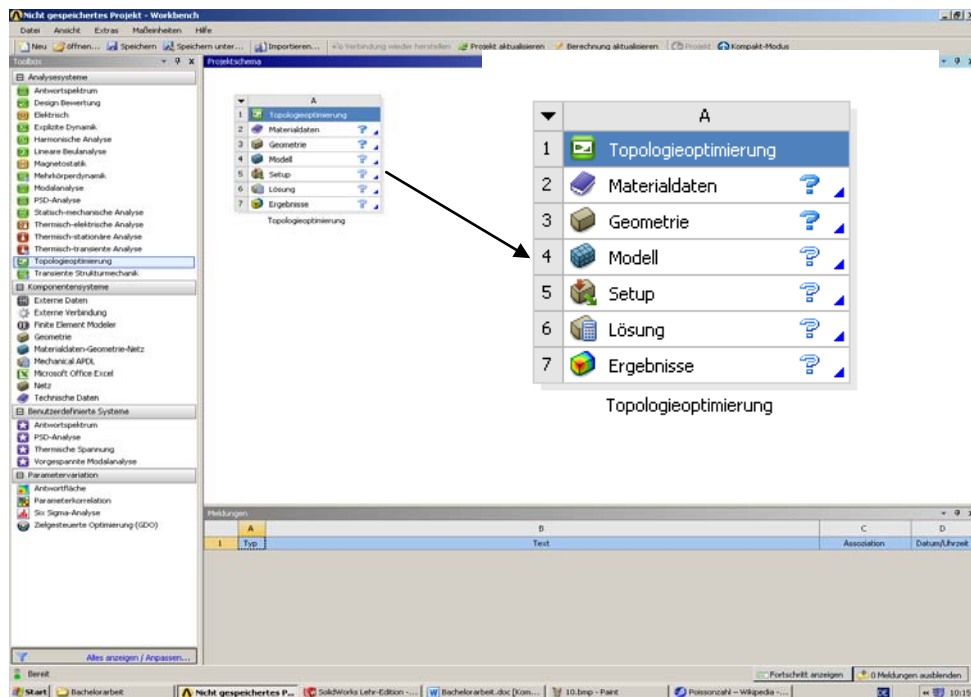


Abbildung 5. 2: Struktur der Topologieoptimierung

Nachdem das Projekt gespeichert und die Geometriezuordnung abgeschlossen ist, kann man mit der rechten Maustaste auf Modell mit bearbeiten das Berechnungsmodull und den Lastfall definieren. Dazu öffnet sich das Fenster der Topologie Optimierung.
Danach müssen Sie das Material für jeden Part ergänzen (Abbildung 5.3).

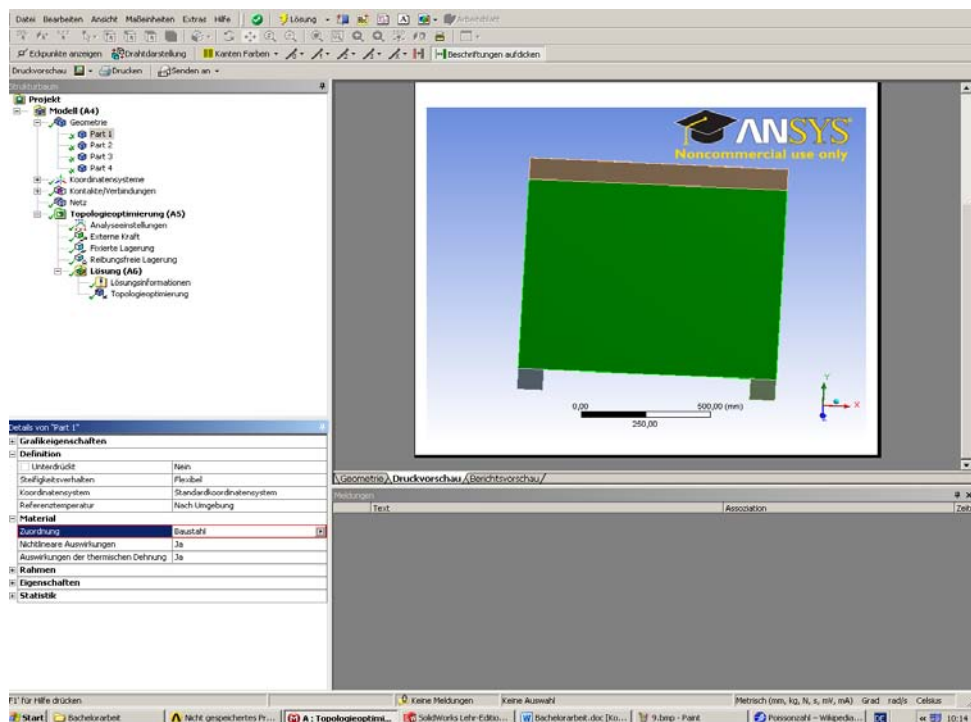


Abbildung 5. 3: Zuordnung des Materials der Maschinen

Für die Maschinen wird mit verschiedene Elementgröße vernetzt. Und in Abbildung 5.4 muss man prüft, dass ob die Maschinen gute vernetzt wird.

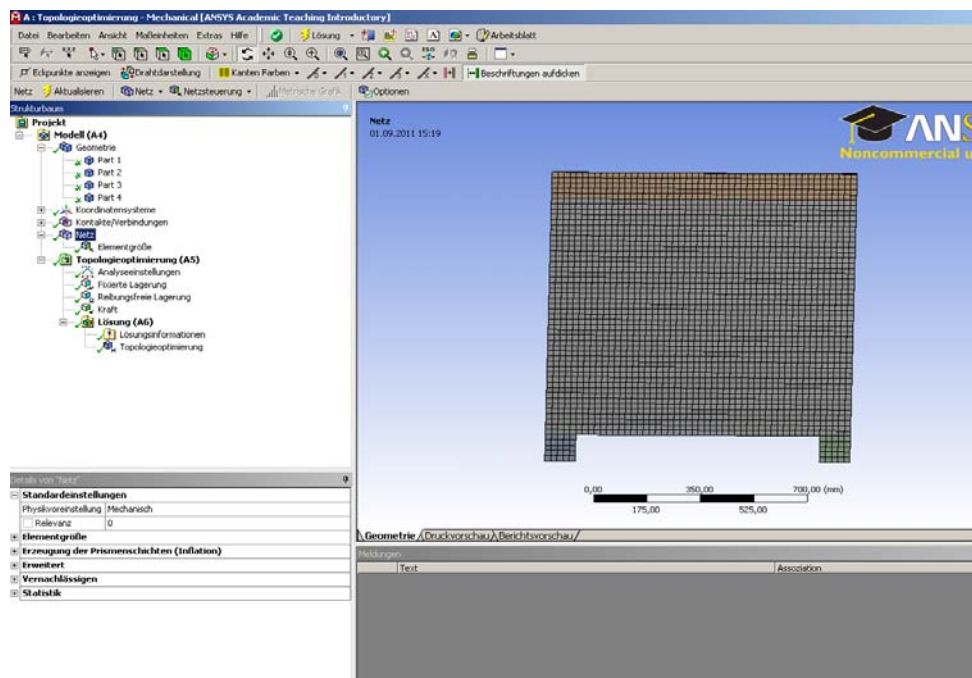


Abbildung 5. 4: Vernetzung der Maschinen

Randbedingungen: In Abbildung 5.5 muss um Lasten und Lagerungen zu definieren, wählt man im Strukturbaum den Lastfall Topologie Optimierung an.

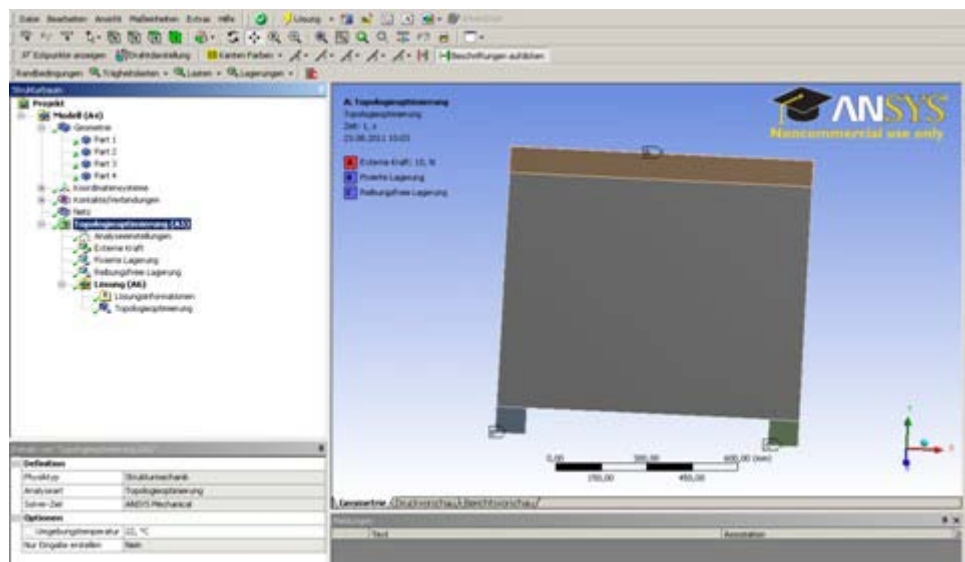


Abbildung 5. 5: Definieren der Randbedingung

Man kann die Lösung des Modells starten. Und in Abbildung 5.6 wählt man die Max. Anzahl der Verfeinerungszyklen und Verfeinerungstiefe aus. Um das Ergebnis höhere Genauigkeit zu berechnen.

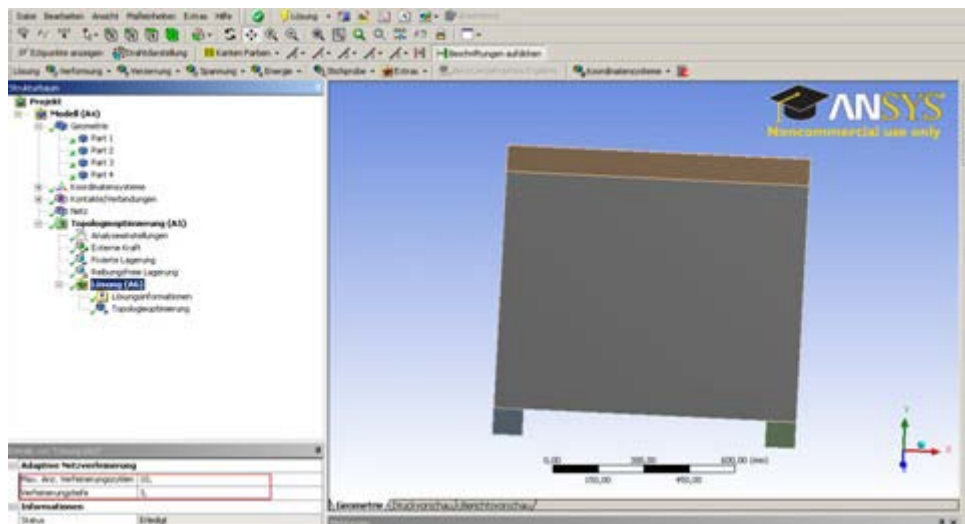


Abbildung 5. 6: Lösung der Maschinen

Danach wählen Sie die Optimierung der Körper aus, und geben die Anzahl von 50% Materialeinsparung an. Jetzt beginnt die LÖSUNG und Simulation wird. In Abbildung 5.7 wird das Ergebnis der Maschinen nach Optimierung gezeigt.

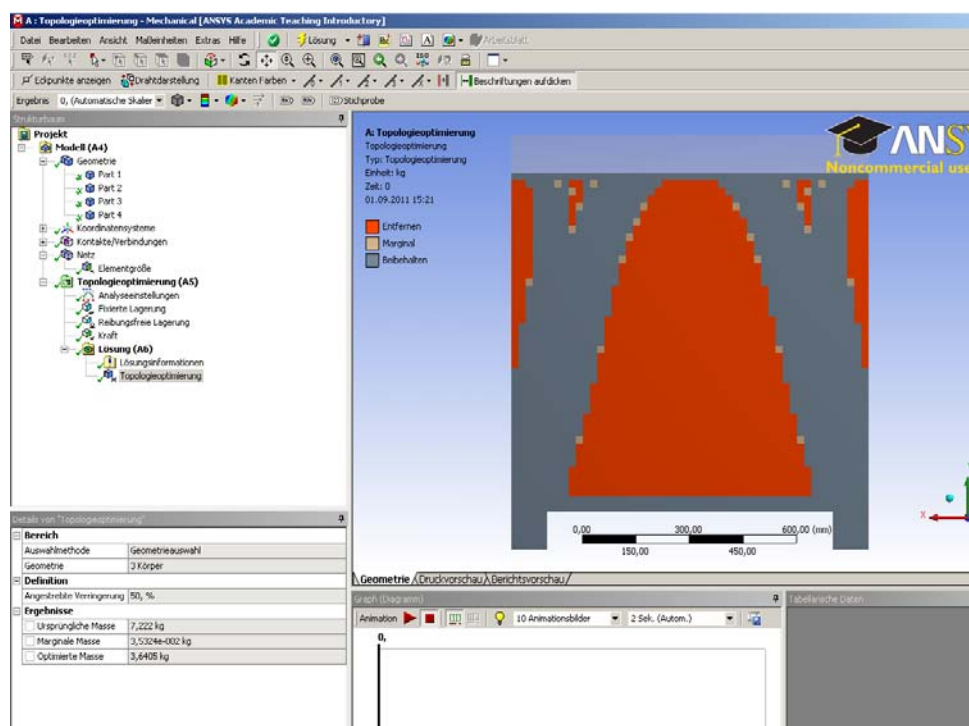


Abbildung 5. 7: Ergebnis der Maschinen

Die Ergebnis der Optimierung ist Genauigkeit mit drei verschiedene Färbe zu erscheinen. Die rote Farbe bedeutet, dass die Material entfernen. Die graue Farbe bedeutet das Material zu beibehalten. Und die Gelbe ist die Marginal der Material.

6. Temperaturfelder

ANSYS Workbench ist dazu in der Lage, stationäre oder instationäre Temperaturverteilungen zu berechnen d.h. die Temperaturverteilung im eingeschwungenen (stationären) Betriebszustand oder während des Aufheizens oder Abkühlens (instationär). Die drei Effekte des Energietransports sind Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion. Je nach physikalischem Prozess wird man einzeln oder kombiniert in der Simulation aufgelöst. [17]

Thermische Analysen können ebenso wie strukturmechanische Analysen nichtlinear sein. Temperaturabhängige Materialeigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität oder Dichte oder temperaturabhängige Randbedingungen wie Wärmeübertragungs-koeffizienten oder Strahlung erfordern dann eine iterative Lösung. Bei den meisten Materialien variieren die thermischen Eigenschaften mit der Temperatur, d.h., üblicherweise ist die Temperaturfeldanalyse nichtlinear. [17]

6.1 Analogie der Gleichungen

Strukturmechanik

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{F}{A} \\ \sigma &= E \cdot \varepsilon \\ \varepsilon &= \frac{du}{dx} = \frac{u}{L} \end{aligned} \right\} K \cdot u = F$$

F: Kraft [N]

σ : Spannung [N/mm²]

ε : Dehnung [-]

u : Verschiebung [mm]

L: Länge [mm]

E: Elastizitätsmodul [N/mm²]

Randbedingungen: u, F, σ

Temperaturfeld

$$\left. \begin{aligned} \dot{q} &= \frac{\dot{Q}}{A} \\ \dot{q} &= -\lambda \cdot t \\ t &= \frac{dT}{dx} = \frac{T}{d} \end{aligned} \right\} K \cdot T = -\dot{Q}$$

\dot{Q} : Wärmestrom [W]

\dot{q} : Wärmestromdicht [W/mm²]

λ : Wärmeleitfähigkeit [W/mm °C]

d: Dicke des Körpers [mm]

T: Temperatur [°C]

Randbedingungen: \dot{T}, \dot{Q}, q

6.2 Wärmeübertragungen

Unter Wärmeübertragung versteht man sämtliche Erscheinungen, die einen räumlichen Transport von Wärme umfassen. Der Wärmeübergang erfolgt immer aufgrund eines Temperaturgefälles, und zwar immer von der höheren zur niederen Temperatur (2. Hauptsatz). [18]

Grundsätzlich sind drei verschiedene Möglichkeiten der Wärmeübertragung möglich: Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung (siehe Abbildung 6.1). [18]

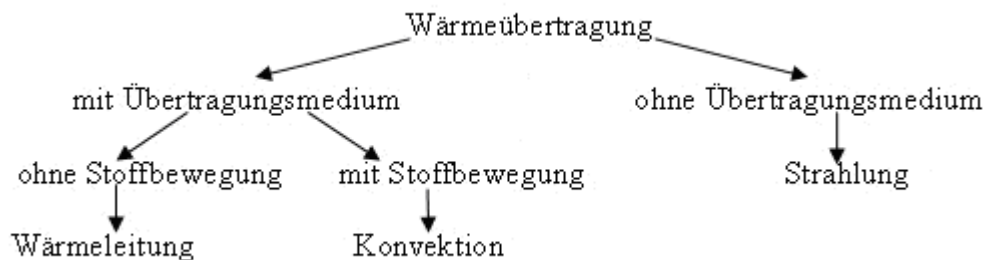


Abbildung 6. 1: Schema der Wärmeübertragung

6.3 Arten der Wärmeübertragung

6.3.1 Wärmeleitung

Unter Wärmeleitung wird in der Physik der Wärmefluss in einem Festkörper, einer Flüssigkeit oder eines Gases infolge eines Temperaturunterschiedes verstanden. [19] Bei der Wärmeleitung wird die Schwingungsenergie zwischen benachbarten Atomen oder Molekülen ohne Materialtransport durch bewegliche Ladungsträger übertragen. Diese Art der Wärmeübertragung ist irreversibel und transportiert die Wärme im statistischen Mittel vom höheren Energieniveau (mit höherer absoluter Temperatur) auf das niedrigere Niveau (mit niedrigerer Temperatur).[20] Aufgrund des Energieerhaltungssatzes geht dabei keine Wärmeenergie verloren. Wärmeleitung ist ein Mechanismus zum Transport von thermischer Energie, ohne dass dazu ein makroskopischer Materialstrom benötigt wird, wie beim alternativen Mechanismus der Konvektion. Auch der Wärmetransport durch Wärmestrahlung wird als getrennter Mechanismus betrachtet. Ein Maß für die Wärmeleitung in einem bestimmten Stoff ist die Wärmeleitfähigkeit. [19]

Im Folgenden wird nur stationäre, eindimensionale Wärmeleitung betrachtet, d.h.[18]

- die Temperatur ändert sich nur in einer Raumrichtung
- die örtliche Temperatur ist zeitlich konstant ($T \neq f(t)$).

6.3.1.1 Fouriersches Gesetz

Die durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung wird durch das Fouriersches Gesetz beschrieben. [19]

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

Formel 6. 1: Fouriersches Gesetz

A: die Fläche, durch die die Wärme strömt.

Der Wärmestrom fließt in umgekehrter Richtung zum Temperaturgradienten.

→ Negatives Vorzeichen

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine temperaturabhängige Stoffkonstante:

- gute Wärmeleiter: großes λ → Flacher Kurvenverlauf
- schlechte Wärmeleiter: kleines λ → Steiler Kurvenverlauf

(siehe Abbildung 6.2) [18]

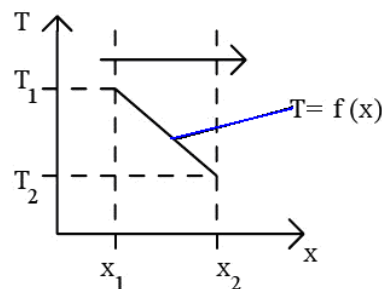


Abbildung 6. 2: Diagramm der Wärmeleitung [18]

Die Wärmeleitfähigkeit eines Festkörpers, einer Flüssigkeit oder eines Gases ist sein Vermögen, thermische Energie mittels Wärmeleitung in Form von Wärme zu transportieren. Die ist von der Temperaturleitfähigkeit zu unterscheiden, der Geschwindigkeit, mit der sich eine Temperaturveränderung durch den Stoff ausbreitet. [20]

Anhaltswerte für die thermische Leitfähigkeit λ

Stoff	Temperatur ϑ in °C	Dichte ρ in 10^3 kg/m^3	Spezifische Wärmekapazität C_p in J/(kg*K)	Wärmeleit-fähig- keit λ in W/(K*m)	Temperatur- leitfähigkeit α in $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Festkörper					
Aluminium	20	2,70	920	221	88,89
Eisen	20	7,86	465	67	18,33
Grauguss	20	ca.7,2	545	ca.50	ca.13
Gold	20	19,30	125	314	130,57
Kupfer	20	8,90	390	393	113,34
Glas	20	2,5	800	0,8	0,4
Beton	20	2,4	880	0,8...1,4	0,54
Stahl 0,6C	20	7,84	460	46	12,78
Flüssigkeiten					
Wasser	20	0,998	4182	0,6	0,144
Wärme-träger Öl	20	0,87	1830	0,134	0,084
Kältemittel R12	-20	1,46	900	0,086	0,065
Gase					
Luft	20	0,00119	1007	0,026	21,8
Kohlendioxid	0	0,00195	827	0,015	9,08
Wasser-damp f	150	0,00255	2320	0,031	5,21

Tabelle 6. 1: Wärmeübertragungseigenschaften einiger Stoffe [21]

6.3.1.2 Beispiele-Fußbodenheizung

Rand- und Anfangsbedingungen: (Abbildung 6.3)

Anfangstemperatur: 0°C

Symmetriebedingungen:

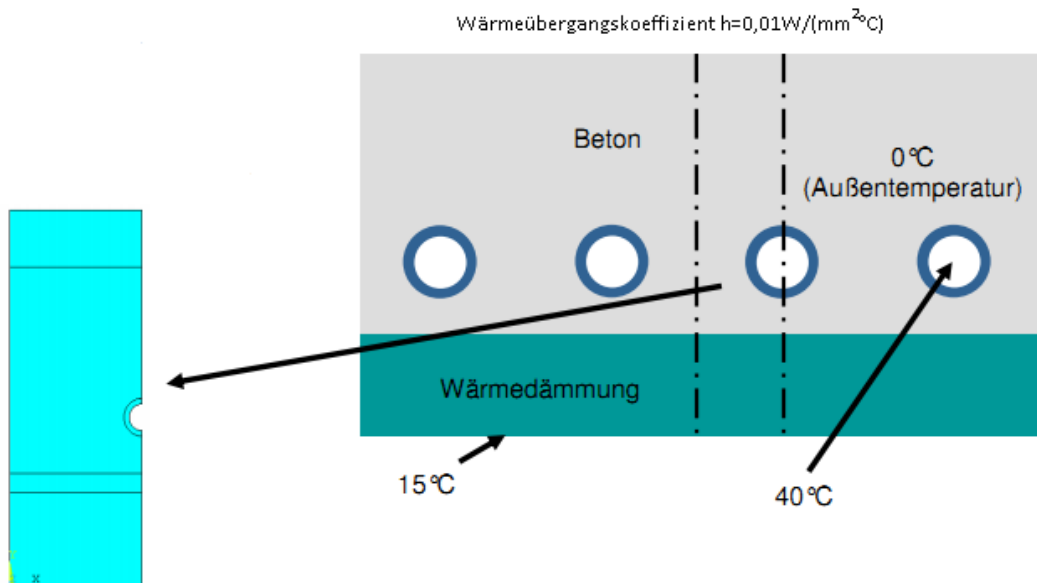


Abbildung 6. 3: Fußbodenheizung

Werkstoffdaten:

	Beton	Wärme-dämmung	Heizungs-rohr
Therm. Leitfähigkeit	1,6 W/Km	0,04 W/Km	1,6 W/Km
Dichte	$2,35 \cdot 10^{-9}$ t/mm ³	$0,5 \cdot 10^{-9}$ t/mm ³	$2,35 \cdot 10^{-9}$ t/mm ³
Spez. Wärme-kapazität	$0,9 \cdot 10^8$ kJ/tK	$2,0 \cdot 10^8$ kJ/tK	$0,9 \cdot 10^8$ kJ/tK
	↓ mat,1	↓ mat,2	↓ mat,3

Tabelle 6. 2: Werkstoffdaten der Fußbodenheizung

6.3.1.2.1 Analyse mit ANSYS Workbench

Sie können das Modell mit Solidworks zeichnen und mit .IGS-Datei speichern. Danach berechnen Sie mit thermisch- transienter Analysen. Muss man die Materialeigenschaften zuerst definieren und weiter die Geometrie importieren. Anschließend startet man die Analyse des Modell. In Abbildung 6.4 wird die Material des jeden Teil zugeordnet.

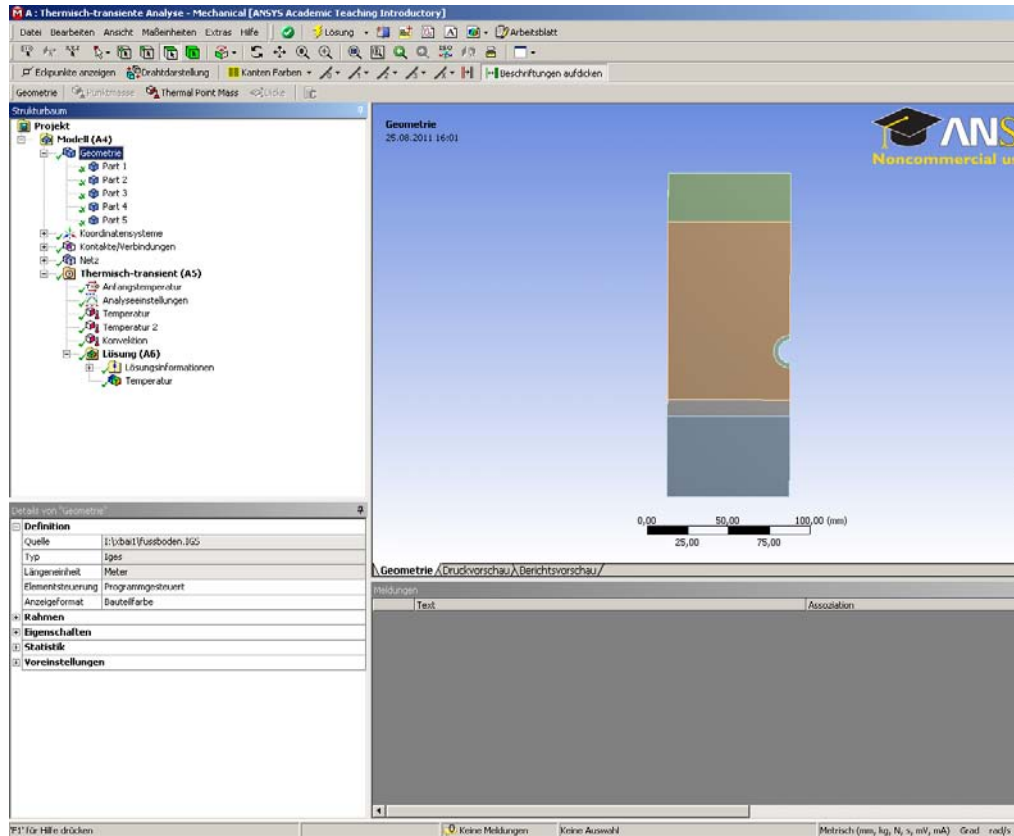


Abbildung 6. 4: Zuordnung der Material der Fußbodenheizung

Bei der Berechnung von Baugruppen werden zwischen den einzelnen Bauteilen automatisch Kontaktbereiche generiert. Der in ANSYS Workbench verwendete Kontaktalgorithmus entspricht dem neuesten Stand der Technik: Flächen-Flächen-Kontaktelemente mit parabolischer Ansatzfunktion und automatische Konvergenzkontrolle sorgen für eine stabile und robuste Berechnung von Baugruppen.[22]

Im KONTAKT-Ordner des Strukturbaums werden die Kontakte zwischen den Teilen verwaltet. Die automatische Kontakttoleranz kann im DETAILFENSTER verändert werden. Manuelle Kontakte werden über die Kontextfunktion KONTAKT generiert. [22]

Folgende Kontakttypen stehen in ANSYS Workbench zur Verfügung.

Kontakttyp	Eigenschaft
Verbund	Fest, verklebt, verschweißt
Keine Trennung	Reibungsfrei gleitend, nicht abhebend
reibungsfrei	Abhebender Kontakt, reibungsfrei
rau	Abhebender Kontakt, Reibfaktor unendlich
reibungsbehaftet	Abhebender Kontakt, Reibfaktor einstellbar

Tabelle 6. 3: Kontakttypen [22]

In Abbildung 6.5 wird die Kontakte zwischen den Teilen gezeigt.

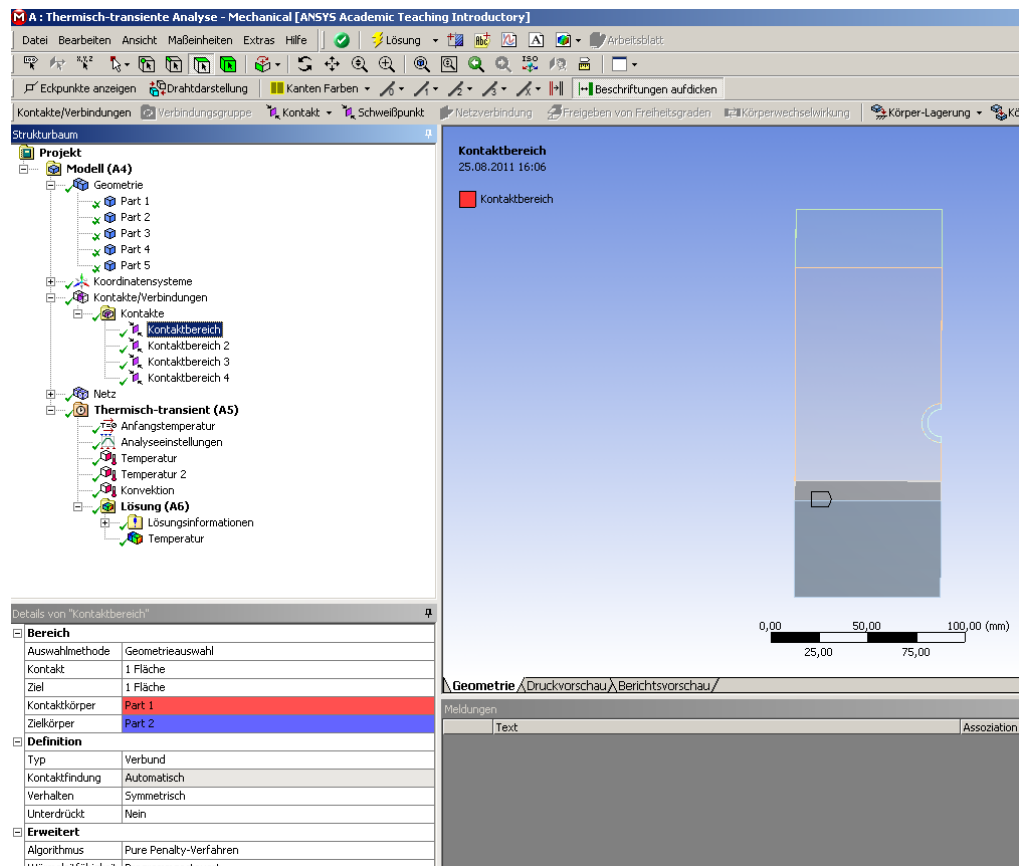


Abbildung 6. 5: Kontakte zwischen beiden Körper

In Abbildung 6.6 wird die Geometrie jedes Teile mit verschiedene Elementgröße vernetzt, und muss jeder Teile prüft.

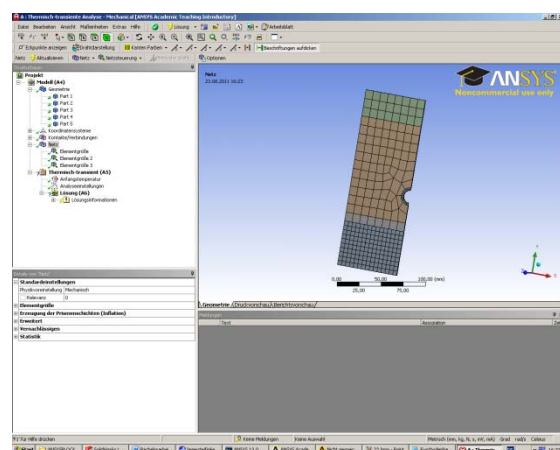


Abbildung 6. 6: Vernetzung der Fußbodenheizung

Randbedingungen : In Abbildung 6.7 wird ein konvektiver Temperaturübergang auf einer Fläche definiert und bekannte Temperatur auf einer Geometrie festgelegt. Werden unterschiedliche Flächen bei der Angabe der Temperatur gewählt, wird derselbe Wert auf alle gewählten Flächen angewandt.

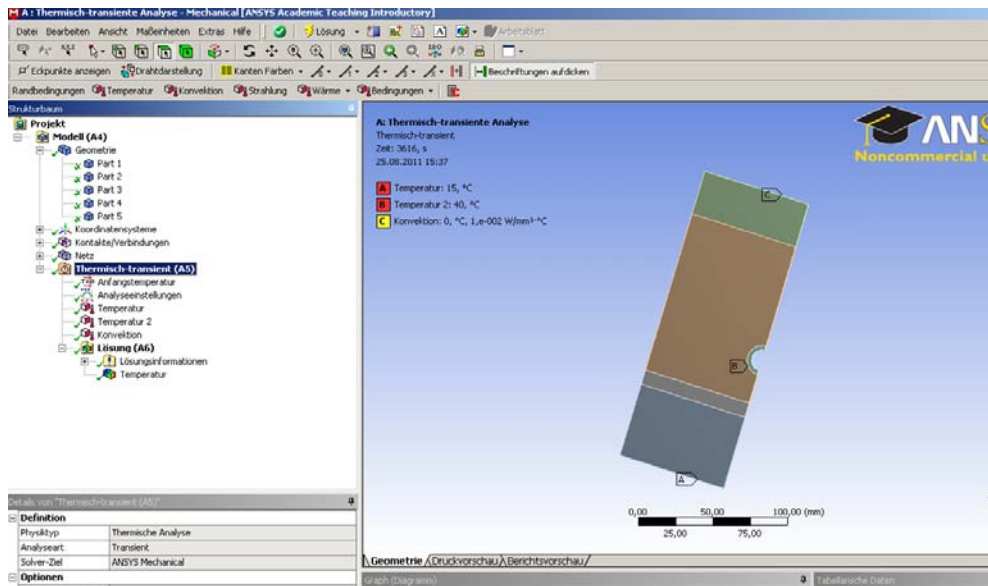


Abbildung 6. 7: Thermische Randbedingungen

In Abbildung 6.8 wird die Analyseeinstellung gezeigt. Werden die Anzahl der Lastschritte und die Zeit nach der Lastschritte eingegeben.

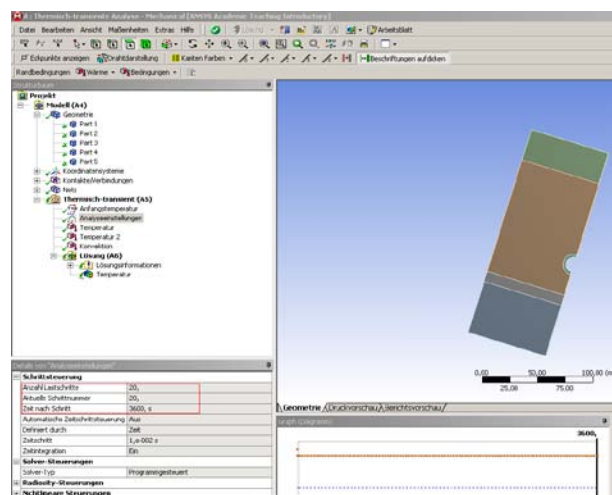


Abbildung 6. 8: Analyseeinstellung der Fußbodenheizung

In Abbildung 6.9 ist das Ergebnis der Temperatur von Fußbodenheizung. Die Wärme übertragen von kunststoffes Rohr mit höherer Temperatur nach Umgebung mit niedrigerer Temperatur.

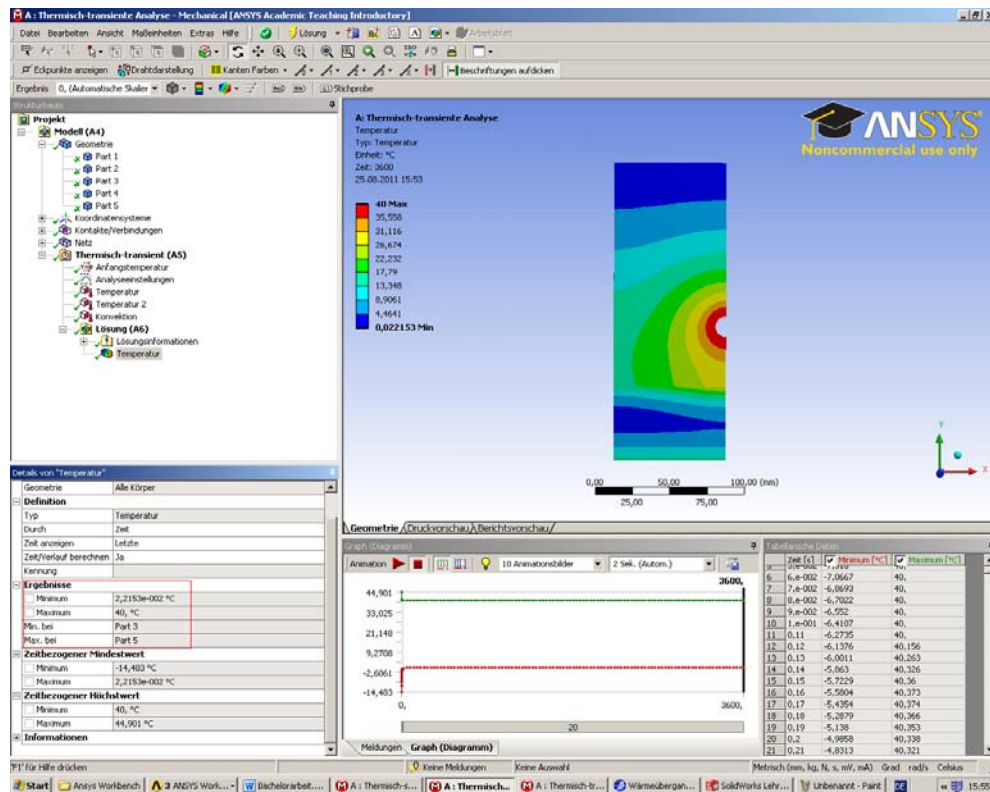


Abbildung 6. 9: Ergebnis der Fußbodenheizung

6.3.2 Konvektion

Die Konvektion tritt auf zwischen zwei thermodynamischen Systemen, die sich relativ zueinander bewegen, wie es beispielsweise bei der Wärmeübertragung von einem Fluid oder Gas an einer Wand der Fall ist.

- Flüssigkeiten und Gase:
 - Schlechte Wärmeleitung, aber guter Wärmetransport durch Konvektion, da Teilchen leicht beweglich
- Feststoffe:
 - Keine Konvektion, da Teilchen im Gitter fest gebunden [23]

Man unterscheidet dabei die

- freie Konvektion, bei der der Teilchentransport ausschließlich durch Auswirkungen des Temperaturgradienten, also zum Beispiel durch Auf- bzw. Abtrieb des Fluides infolge der durch die Temperaturänderung hervorgerufenen Dichteunterschiede bewirkt wird, und
- erzwungene Konvektion, bei der der Teilchentransport durch äußere Einwirkung, zum Beispiel ein Gebläse oder eine Pumpe, hervorgerufenen Druckunterschiede bewirkt wird.

Freie Konvektion aufgrund thermischer Dichteunterschiede: Bei Erwärmung dehnen sich Stoffe in der Regel aus(z.B. die Dichteanomalie des Wassers). Unter Einwirkung der Gravitationskraft steigen innerhalb eines fluiden Bereiche mit geringerer Dichte gegen das Gravitationsfeld auf (Auftrieb), während Bereiche mit höherer Dichte darin absinken.[24]

6.3.2.1 Berechnung bei Konvektion

Es gilt die infolgende allgemeine Gleichung:

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha_T \cdot \Delta T$$

Formel 6. 2: Wärmestrom bei Konvektion

$$\dot{q} = \alpha_T \cdot \Delta T$$

Formel 6. 3: Wärmestromdicht

α_T : Wärmeübergangszahl in W/(m²K)

\dot{q} : flächenspezifischer übergehender Wärmestrom oder Wärmestromdicht in W/m²

ΔT : Temperaturgefälle zwischen Fluid und Wand [25]

Die Wärmeübergangszahl kann verstanden werden als der Wärmestrom, der auf 1m² Wandfläche, je K Temperaturdifferenz übergeht. Die hängt z.B. ab von:

- Physikalischen Eigenschaften der Stoffe (Dichte, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Viskosität,...)
- Art der Strömung und der Strömungsgeschwindigkeit
- Geometrie des um- oder durchströmten Körpers
- Oberflächenbeschaffenheit

(berücksichtigt auch Wärmeleitung und Wärmestrahlung) [23]

6.3.3 Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ist ein Teil der elektromagnetischen Strahlung, die ein Körper auf Grund seiner Temperatur aussendet. Meist wird die Energie durch infrarote Wellen, die ein Teil des elektromagnetischen Spektrums sind, transportiert. Im kosmischen, aber auch im submolekularen Bereich, sind auch andere Wellenlängen bzw. Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums am Energietransport im prozentual nennenswerten Umfang beteiligt. Bei der Wärmestrahlung gibt es nicht nur eine Wärmeübertragung

von warm nach kalt, sondern auch von kalt nach warm. Der Wärmestrom von warm nach kalt ist aber immer größer als umgekehrt, so dass die Resultierende von beiden Wärmeströmen immer von warm nach kalt zeigt. Mit anderen Worten: Der Temperaturunterschied wird insgesamt immer weiter verringert. Wärmestrahlung ist die einzige Wärmeübertragungsart, die auch das Vakuum durchdringen kann. [20]

6.3.3.1 Berechnung der Wärmestrahlung

Der von einem Körper abgestrahlte Wärmestrom \dot{Q} kann für einen Körper über das Stefan-Boltzmann-Gesetz wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Formel 6. 4: Wärmestrom bei Wärmestrahlung [26]

$$\varepsilon = \frac{M_e}{M_{e,s}}$$

Formel 6. 5: Emissionsgrad [26]

$$M_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Formel 6. 6: spezifische Ausstrahlung [26]

\dot{Q} : Wärmestrom bzw. Strahlungsleistung

ε : Emissionsgrad; zwischen 0 und 1; für einen idealen Schwarzen Körper gilt $\varepsilon = 1$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$: Stefan-Boltzmann- Konstante

A: Oberfläche des abstrahlenden Körpers

T: Temperatur des abstrahlenden Körpers (in Kelvin)

M_e : spezifische Ausstrahlung des grauen Körpers

$M_{e,s}$: spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers [27]

Die für die Wärmestrahlung maßgebende Gleichung, das Stefan-Boltzmann-Gesetz, beschreibt den durch Wärmestrahlung ausgetauschten Wärmestrom zwischen zwei Oberflächen A_1 und A_2 mit Temperaturen T_1, T_2 ergibt sich nach: [28]

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Formel 6. 7: Netto-Wärmestrom von 1 zu 2

C_{12} : Strahlungsaustauschkoeffizient

Die Abbildung 36 zeigt für einige geometrische Konfigurationen den Strahlungsaustauschkoeffizienten C_{12} :

$$C_{12} = F_{12} \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma$$

Formel 6. 8: Strahlungsaustauschkoeffizient C_{12}

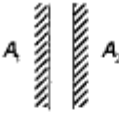

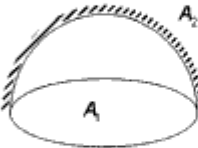
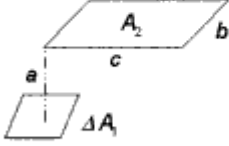

Geometrie	Strahlungsaustauschkoeffizient
	parallele Flächen $C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$
	konvexe Fläche A_1 von konkaver Fläche A_2 umschlossen $C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$
	Halbraum A_2 über ebener Fläche A_1 $C_{12} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma}{1 - \frac{1}{2}(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)}$
	Rechteckfläche A_2 parallel zum Flächenelement A_1 $C_{12} = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{1}{2\pi} \left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \arctan \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} + \frac{c}{\sqrt{a^2 + c^2}} \arctan \frac{b}{\sqrt{a^2 + c^2}} \right)$
	Rechteckfläche A_2 senkrecht zum Flächenelement A_1 $C_{12} = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{1}{2\pi} \left(\arctan \frac{b}{a} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}} \arctan \frac{b}{\sqrt{a^2 + c^2}} \right)$

Tabelle 6. 4: Strahlungsaustauschkoeffizienten [28]

Noch gilt es die Gleichung des Wärmestrom des Strahlungsaustausch mit: [28]

$$\dot{Q} = A_i \cdot F_{ij} \cdot \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_j^4)$$

Formel 6. 9: Wärmestrom des Strahlungsaustausch

\dot{Q} : Wärmestrom

A_i : Fläche i des Strahlers

F_{ij} Formfaktor der Zielfläche j bezogen auf Strahlerfläche i

ε_i Emissionsgrad der Oberfläche i

σ Stefan-Boltzmann- Konstante, $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W } / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

T_i^4 Absolute Temperatur der Strahler Oberfläche i

T_j^4 Absolute Temperatur der Zieloberfläche j

Es ist zu beachten, dass die Temperaturen der Oberflächen als absolute Temperaturen zu berücksichtigen sind, d. h. sie müssen z. B. in Kelvin (K), nicht jedoch in Celsius (°C) eingesetzt werden. Der physikalische Einfluss ist durch die Beschaffenheit der Strahleroberflächen gegeben, er wird durch den dimensionslosen Wert des Emissionsgrades ε_i beschrieben. Die geometrischen Bedingungen zwischen Strahler und Empfänger sind im dem Formfaktor F_{ij} zusammengefasst. Dieser Formfaktor wird wesentlich beeinflusst durch die Orientierung (Neigung) beider Flächen zueinander sowie durch den Raumwinkel, den der Strahlungsempfänger vom Strahlungssender aus gesehen einnimmt. [28]

6.3.3.2 Beispiele zu Wärmestrahlung

6.3.3.2.1 Analysen die Wärmeübertragung mit der Strahlung

Aufgabestellung: Strahlung zwischen beiden Zylindern

Die beiden Zylinder bewegen in einem Gehäuse, in dieses Gehäuse hat die Temperatur 100°C. Und die Temperatur der inneren Oberfläche des inneren Zylinders ist 200°C, die Temperatur der äußeren Oberfläche des äußeren Zylinders ist 80°C. Anfangstemperatur von 0°C (Abbildung 6.10). [29]

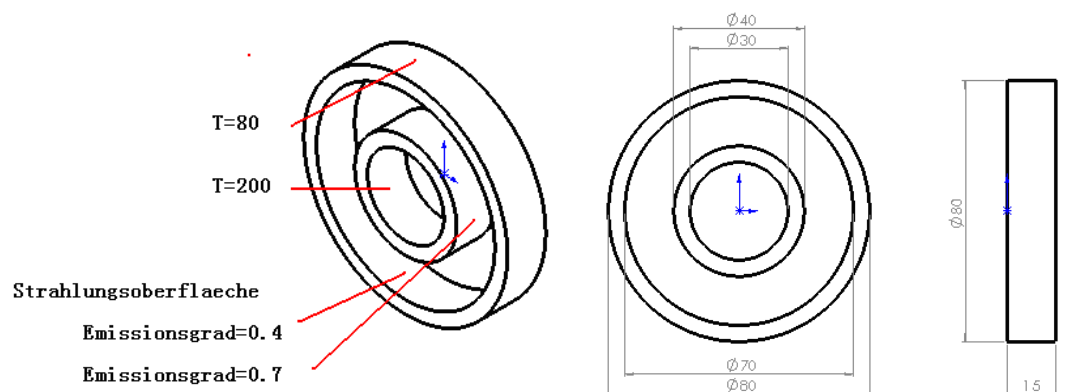


Abbildung 6. 10: Aufbau der Wärmestrahlung

6.3.3.2 Berechnung mit ANSYS Workbench

Berechnet man die Wärmestrahlung mit ANSYS Workbench. Zuerst definiert man die Material und wählen die Aluminium aus. Mit rechter Maustaste klickt man die Geometrie Importieren/Durchsuchen und importieren die .IGS-Datei. Danach wird der Modell gestartet zu berechnen (Abbildung 6.11).

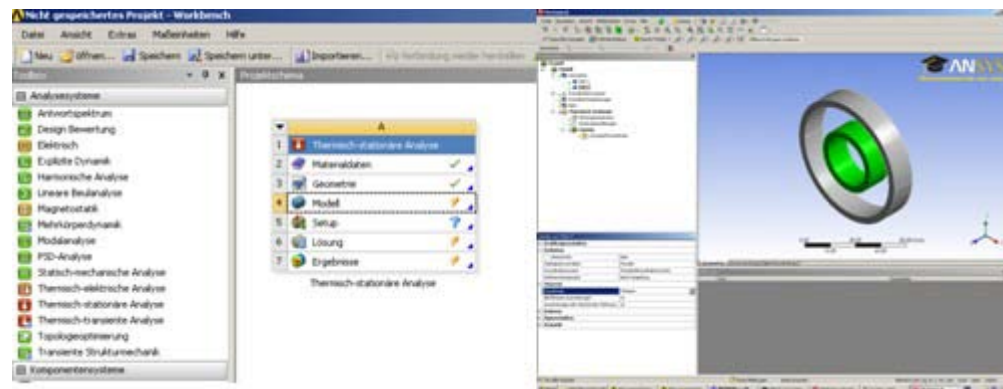


Abbildung 6. 11: Importieren der Geometrie

Man selektiert die Material für jeden Volumenkörper und mit strukturiertem Netz wird die Geometrie vernetzt.

Bei Netz klicken Netzsteuerung/Srukтуриiertes Netz. In Standardeinstellung ist automatisch. In Abbildung 6.12 bestimmt man die beide Flächen zu auswählen und klickt die Aktualisieren.

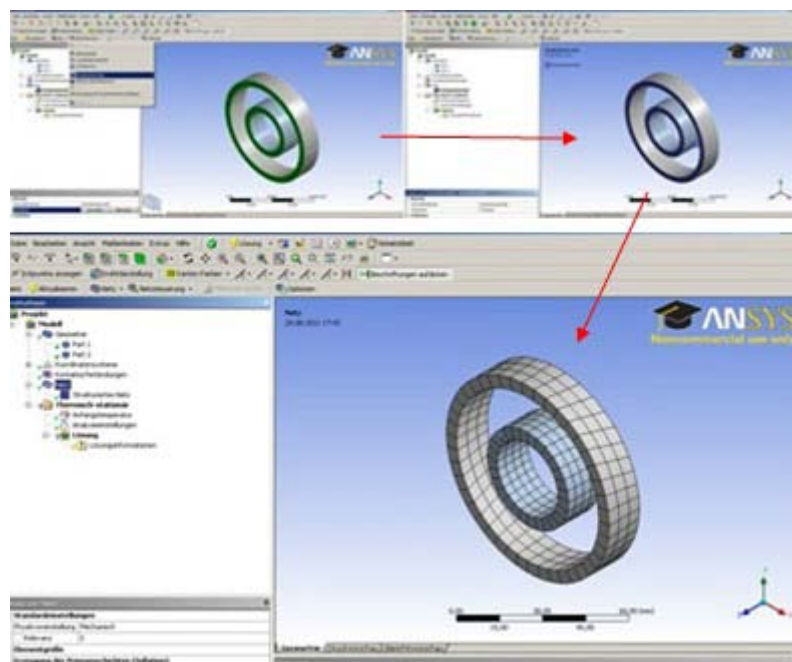


Abbildung 6. 12: Vernetzung der Geometrie

Man benennt die beiden Volumenkörper wie Innen und Außen um. Danach hinzufügt man zwei Komponente und wählt die Innenoberfläche der äußeren Zylinder und die Außenoberfläche der inneren Zylinder, damit wird die Innenoberfläche und die Außenfläche umbenannt.(siehe Abbildung 6.13)

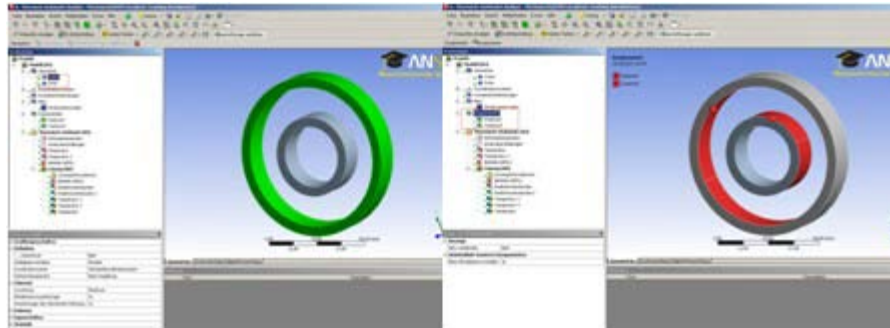


Abbildung 6. 13: Hinzufügen der Komponenten

Randbedingungen

In Abbildung 6.14 wird in thermisch-stationäre Analyse die Temperatur der beiden Oberflächen definiert, damit werden der äußeren Oberfläche der äußeren Zylinder und die inneren Oberfläche der inneren Zylinder selektiert.



Abbildung 6. 14: Definieren der Temperatur

In thermisch- stationäre Analyse wird einige Bedingungen nicht definiert, kann man mit Befehle definieren. In Abbildung 6.15 wird die Befehle der Bedingungen gezeigt.

Man benutzt die Befehle „SF“ für die Randbedingungen der Oberfläche zu definieren. Allgemeine Befehle:

SF, nlist, label, value, value2

nlist: Selektieren der Knoten für die Emissionsgrad

RDSF: für die Strahlung

Value: die Emissionsgrad der Oberfläche

Value 2: die Anzahl der abgeschlossenen System

Wegen das nicht ein abgeschlossenen System ist, so muss die Temperatur des Raums definieren, damit die Befehle:

SPCTEMP, enclosure number, Temperatur

Man muss noch die Stefan-Boltzman-Konstant und die Abweichung der Temlperatur definieren, weil die Wärmestrahlung in absolute Temperatur berechnet wird. Die Berechnung wird in bestimmte Solver der Strahlung lösen muss und mit der Befehl „RADOPT“ definieren.

RADOPT, --, FIUXTOL, SOLVER, MAXITER, TOLER, OVERRLEX

--: ungenutzte Bereich

FLXTOL: Konvergenz Toleranz für Strahlungsfluss. Defaults bis 000001 für ANSYS Wärmestrahlung Analyse und FLOTTRAN Oberflächenstrahlung Analyse.

SOLVER: Wahl der Solver für Strahlungsfluss-Berechnung. 0 ist Iterative Solver (default), 1 ist direkte Solver.

MAXITER: Maximale Anzahl der Iterationen für iterative Solver (Solver= 0).Der Standardwert ist 1000.

TOLER: Konvergenz Toleranz für die iterative Solver (Solver= 0). Der Standardwert ist 0,1.

OVERRLEX: über Entspannungsfaktor angewandt, um die iterative Solver (Solver=0). Der Standardwert ist 0,1.

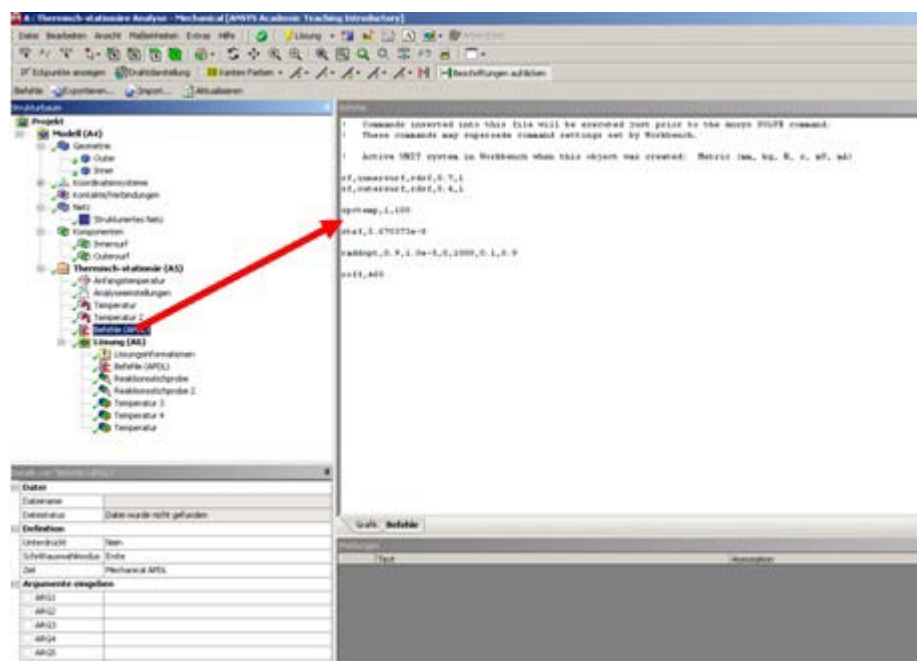


Abbildung 6. 15: Befehle der Randbedingungen

In Abbildung 6.16 und Abbildung 6.17 werden die Temperatur der inneren Zylinder und der äußeren Zylinder berechnet, und die Wärme wird durch die Emissionsgrad von höherer Temperatur nach niedrigerer Temperatur überträgt

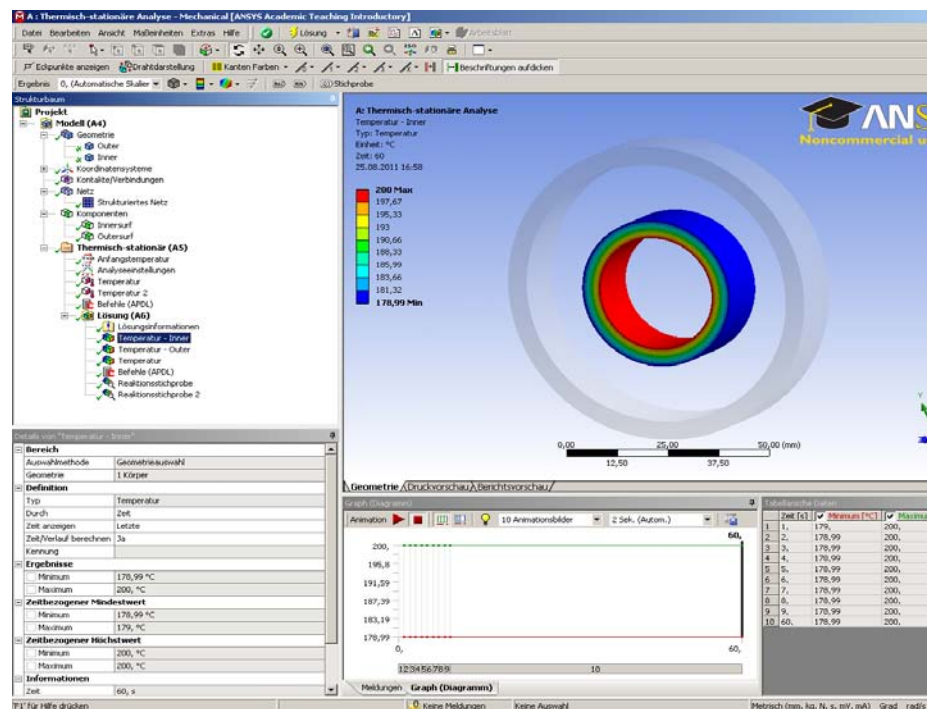


Abbildung 6.16: Temperatur der inneren Zylinder

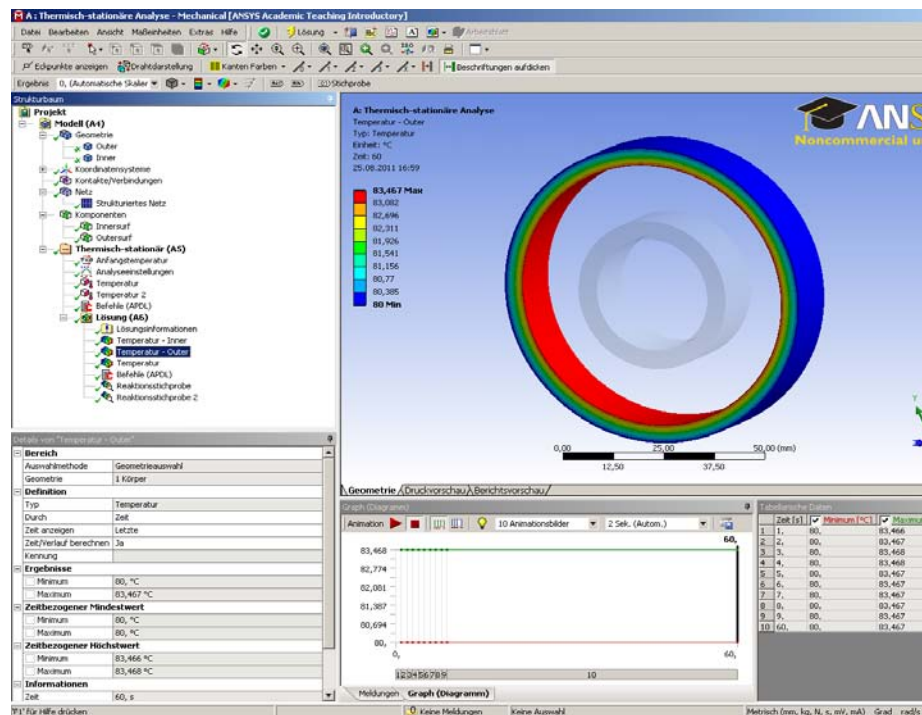


Abbildung 6.17: Temperatur der äußeren Zylinder

Von Abbildung 6.18 kann man die Temperatur zwischen beiden Zylindern ablesen. Es gilt die niedrige Temperatur der äußeren Zylinder, und das Raum zwischen beider Zylinder noch haben die Temperatur.

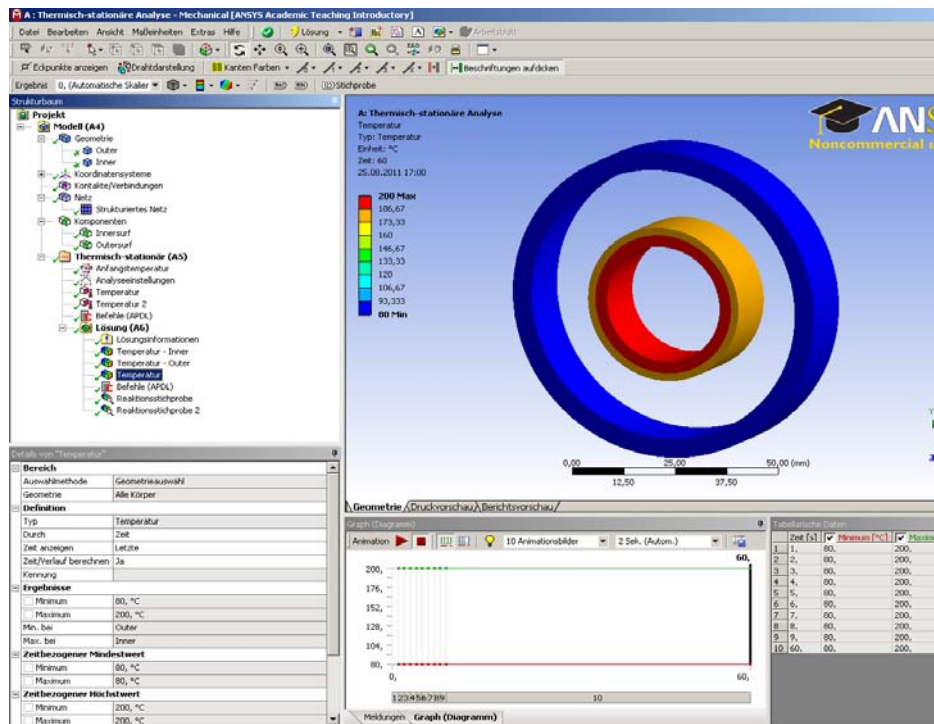


Abbildung 6. 18: Temperatur zwischen beider Zylindern

ANSYS berechnet die Wärmestrom der Knoten des fließenden Raum, d. h. der Wert der Netto-Wärme-Rate durch ein Gehäuse verloren, aber erhältet die in Simulation nicht direkt, muss in Niederlassung der Simulation die Wärmestrom durch die Befehl mit „*GET“ erhältet wird. Und dies Prozess kann nur vor der Lösung fertig machen. Zur Achtung wird die Befehl nach /Post1 gestanden, d. h., die gleiche Befehle sind in der Post-Prozessor-Befehl Zustand und die Lösungszustand verschiedene. Hinzufügen der Befehl in Abbildung 6.19 zu lösen.

***Get, spacerate, rad, 1, nethf**

Spacerate: der Name der resultierenden Parameter.

Rad: entity keyword

Nethf: Wert der Netto-Wärme-Rate durch ein Gehäuse verloren.

1: die Anzahl der Gehäuse

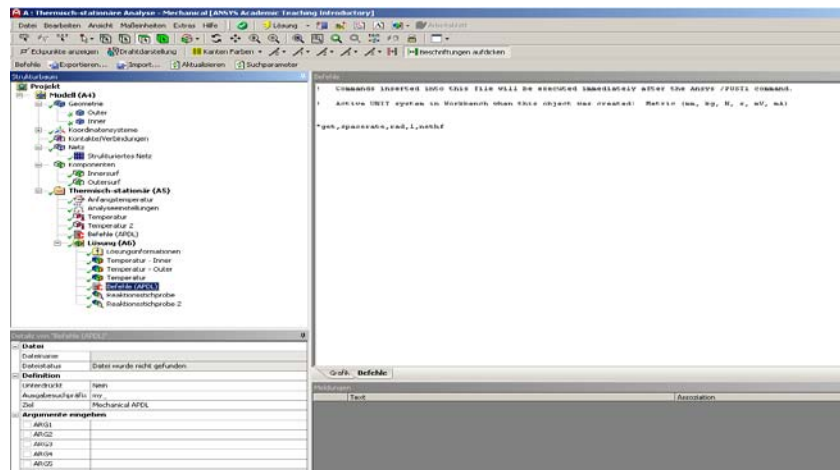


Abbildung 6.19: Befehl der Lösung

Man berechnet noch die Reaktionsstichprobe der beiden Zylindern. In Abbildung 6.20 beträgt die Wärme der inneren Oberfläche der inneren Zylinder 1633 W. Und in Abbildung 6.21 beträgt die Wärme der äußeren Oberfläche der äußeren Zylinder -561,74W.

Der Betrag von 1633W ist die einfließende Wärme durch die Reaktionsstichprobe 1 zu erhalten. Und der Betrag von 561,74W ist die abfließende Wärme durch die Reaktionsstichprobe 2 zu erhalten. Der Wert der Subtraktion der beiden Beträge ist 1081,26W, dass wird die Netto-Wärme-Rate durch das Gehäuse verloren.

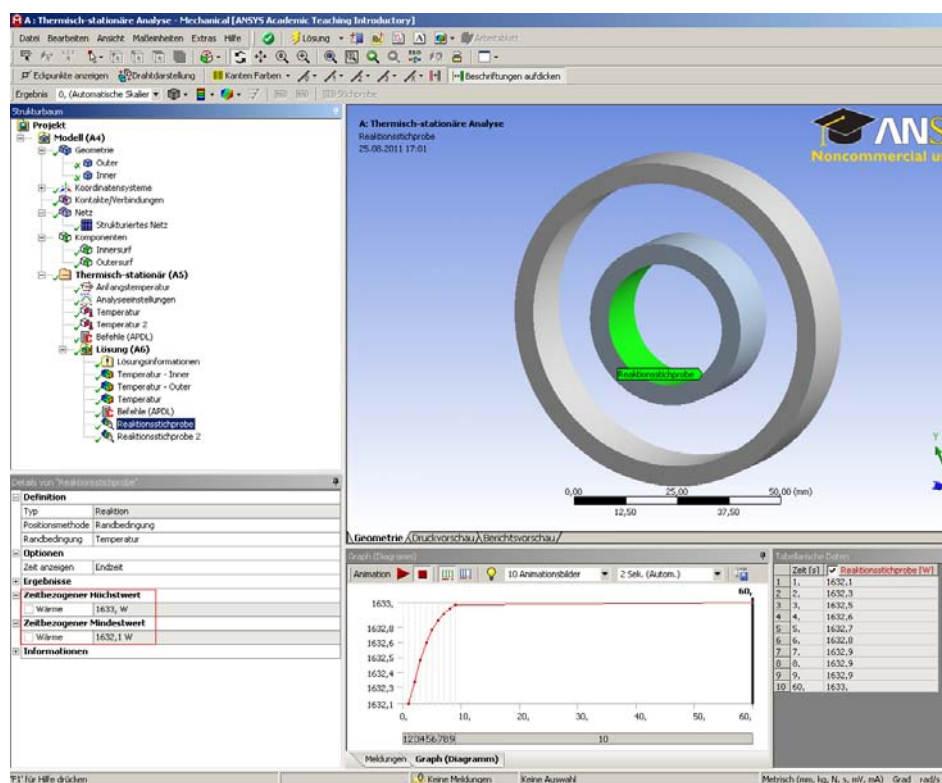


Abbildung 6.20: Einfließende Wärme

7.Literaturverzeichnis

Bücher

- [2] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S19
- [6] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S135
- [7] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S156
- [8] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S160-S162
- [9] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S174-S180
- [10] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S199
- [11] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S204-S207
- [14] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S46
- [15] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S324
- [16] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S73
- [17] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S84
- [21] Günter Cerbe, Hans-Joachim Hoffmann: Einführung in die Thermodynamik von den Grundlagen zur technischen Anwendung, 13. Auflage. S325
- [22] Christof Gebhardt: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. S164
- [25] Günter Cerbe, Hans-Joachim Hoffmann: Einführung in die Thermodynamik von den Grundlagen zur technischen Anwendung, 13. Auflage. S332
- [27] Günter Cerbe, Hans-Joachim Hoffmann: Einführung in die Thermodynamik von den Grundlagen zur technischen Anwendung, 13. Auflage. S349

Internet

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Finite-Elemente-Methode>, verfügbar am 15.08.2011
- [3] <http://de.wikipedia.org/wiki/Ansys>, verfügbar am 24.08.2011
- [4] <http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:o8ye2yeIUcAJ:www.bauwesen.tu-dortmund.de/nmi/Medienpool/Skripte/ansys-workshop061002.pdf+ansys+workbench&hl=de&gl=de&pid=bl&srcid=ADGEEShkrfdtsxRHKhT6HA5t22RqxbYYsbQ2V6buPQ8I-ljQJ-LBVRp5MEeB5IPFYVgw5RJzo5TXatHMUmH3wC1W9TrS6Vu47d7qphxst9MOtWTlp5lCmoQ0kBG63kKjEw3nUuCr2Ez&sig=AHIEtbQSqE7pkWfdW4HRY6qeCwy91n2QSQ>, verfügbar am 24.08.2011
- [5] http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:23IzodZbgHEJ:www.brichzin.de/seminarfach/SA07_FiniteElemente.pdf+Finite-Elemente-Methode&hl=de&gl=de&pid=bl&srcid=ADGEESimYTTldhlOGuWR8vI6_XWoRBViQVfd_-HmpwSwOKI1V7vw--jU_hBHxqg3kyaPJYw3WiXqBMQvmGPAtiUcxydU_8XelpkCphbINyWqYDuaRzkZcyp9Hk_9898QO7ys49l6Fl94&sig=AHIEtbSvMZ35dfAYB-yp2ROiho9q357N7Q, verfügbar am 24.08.2011
- [13] <http://de.wikipedia.org/wiki/Vergleichsspannung>, verfügbar am 25.08.2011
- [18] http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:8JoAIwJN8wYJ:www.surfersisland.ch/poolpartner/waermedurchgang.pdf+w%C3%A4rme%C3%BCbertragungen&hl=de&gl=de&pid=bl&srcid=ADGEESgLgD77T4ZqKYTTa0fvrVqPb3NR58wsEOL7vziROM6UhsLWBqCwvSMnwJ0R2OUsL1aeVRqIz14nzb_yuImw7G015WNxSIh1dlpZET9xuF1v28hFIM_qx34TO02sAFHtAqlN4Sz&sig=AHIEtbQnUxruJlxanyds8JFi8AtvBUaVMA, verfügbar am 27.09.2011
- [19] <http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitung>, verfügbar am 27.08.2011
- [20] <http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit>, verfügbar am 28.08.2011
- [23] http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:8JoAIwJN8wYJ:www.surfersisland.ch/poolpartner/waermedurchgang.pdf+w%C3%A4rme%C3%BCbertragungen&hl=de&gl=de&pid=bl&srcid=ADGEESgLgD77T4ZqKYTTa0fvrVqPb3NR58wsEOL7vziROM6UhsLWBqCwvSMnwJ0R2OUsL1aeVRqIz14nzb_yuImw7G015WNxSIh1dlpZET9xuF1v28hFIM_qx34TO02sAFHtAqlN4Sz&sig=AHIEtbQnUxruJlxanyds8JFi8AtvBUaVMA, verfügbar am 28.08.2011
- [24] <http://de.wikipedia.org/wiki/Konvektion>, verfügbar am 28.08.2011
- [27] <http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmestrahlung>, verfügbar am 29.08.2011
- [28] http://books.google.de/books?id=0Nbv_c3WnEMC&pg=PA13&lpg=PA13&dq=Strahlungsaustauschkoeffizient&source=bl&ots=2tdgqYtpfZ&sig=H50qxTd9zROIT6G_AGnT9h_wHH0&hl=de&ei=btppTp2XD87bsgbJwaH1BA&sa=X&oi=book_resu&it&ct=result&resnum=10&ved=0CDkQ6AEwCQ#v=onepage&q=Strahlungsaustauschkoeffizient&f=false, verfügbar am 30.08.2011
- [29] <http://www.docin.com/p-135058325.html>, verfügbar am 30.08.2011

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Bearbeitungsort, Datum

Unterschrift